

医学物理

Japanese Journal of Medical Physics

2023

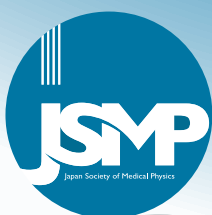
Vol. 43

1

<http://www.jsmp.org/>

JSMP

Japan Society of Medical Physics



令和 5年
第43巻 1号



日本医学物理学会機関誌

目 次

解 説

技術報告書「前立腺癌密封小線源永久挿入治療におけるヨウ素125シード線源の品質保証」

¹²⁵I線源強度計測課題検討ワーキンググループ；小島 徹，川村愼二，大谷侑輝，山田崇裕，
岡本裕之，加茂前 健，山下 修，大下 崇，黒澤忠弘，脇谷雄一郎，花田剛士，萬 篤憲，
浪花健太，茂藤隆広，長谷川軍司，古畑 優，藤井克尚…………… 1

〈RPT誌特集〉

表彰報告

2021年度RPT誌土井賞（優秀論文賞）・MCA・優秀査読者賞表彰の報告

納富昭弘…………… 17

論文紹介

RPT誌土井賞受賞論文：U-Netを用いた各種臓器の自動セグメンテーションにおける
サンプルサイズとデータオーグメンテーションの効果

根本貴文，二上菜津実，国枝悦夫，八木政道，武田篤也，秋庭健志，エリデムツ，茂松直之 …… 19

RPT誌土井賞受賞論文：脳PETにおける画像位置合わせ及び部分容積効果補正を同時に
行うフレームワークの提案

松原佳亮，茨木正信，志田原美保，木下俊文…………… 20

RPT誌土井賞受賞論文：全乳房放射線照射における，3次元畳み込みニューラルネットワーク
を用いた臨床標的体積の自動セグメンテーションの，勾配加重クラス活性化マッピングを
用いた検証

大矢めぐみ，杉本 聡，笹井啓資，横山和仁…………… 21

施設紹介

広島大学大学院医系科学研究科医学物理士養成コースの紹介

齋藤明登…………… 22

書 評

『放射線物理学』“Physics of Nuclear Radiations: Concepts, Techniques and Applications”

渡部浩司…………… 25

連載コラム：シカゴ通信

チリ，グアム島，チェコ，アルゼンチン

土井邦雄…………… 26

編集後記

【複写される方へ】

本誌に掲載された著作物を複写したい方は，（社）日本複写権センターと包括複写許諾契
約を締結されている企業の方でない限り，著作権者から複写権等の行使の委託を受けてい
る次の団体から許諾を受けて下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3階 一般社団法人 学術著作権協会
FAX: 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

著作物の転載・翻訳のような，複写以外の許諾は，直接本会へご連絡下さい。

CONTENTS

REVIEW

Technical Report: Quality Assurance for ^{125}I Seed Sources in Permanent Prostate Brachytherapy Working Group on Issues of I-125 Seed Dosimetric Assay; Tooru KOJIMA, Shinji KAWAMURA, Yuki OTANI, Takahiro YAMADA, Hiroyuki OKAMOTO, Takeshi KAMOMAE, Osamu YAMASHITA, Takashi OOSHITA, Tadahiro KUROSAWA, Yuichiro WAKITANI, Takashi HANADA, Atsunori YOROZU, Kenta NANIWA, Takahiro MOTO, Gunji HASEGAWA, Yu FURUHATA, Katsuhisa FUJII	1
--	---

INTRODUCTION OF AWARDS OF RPT IN 2021

Akihiro NOHTOMI	17
-----------------------	----

ARTICLE REVIEWS

RPT Doi Award: Effects of sample size and data augmentation on U-Net-based automatic segmentation of various organs Takafumi NEMOTO, Natsumi FUTAKAMI, Etsuo KUNIEDA, Masamichi YAGI, Atsuya TAKEDA, Takeshi AKIBA, Eride MUTU, Naoyuki SHIGEMATSU	19
RPT Doi Award: Iterative framework for image registration and partial volume correction in brain positron emission tomography Keisuke MATSUBARA, Masanobu IBARAKI, Miho SHIDAHARA, Toshibumi KINOSHITA, for the Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative	20
RPT Doi Award: Investigation of clinical target volume segmentation for whole breast irradiation using three-dimensional convolutional neural networks with gradient-weighted class activation mapping Megumi OYA, Satoru SUGIMOTO, Keisuke SASAI, Kazuhito YOKOYAMA	21

INTRODUCTION OF RESEARCH FACILITY

Introduction of Medical Physics Course at Hiroshima University Akito SAITO	22
---	----

BOOK REVIEW	25
-------------------	----

COLUMN: Chicago Report

Chile, Guam Island, Czech, and Argentina Kunio DOI	26
---	----

EDITOR'S NOTE	43
---------------------	----

解説

技術報告書「前立腺癌密封小線源永久挿入治療における
ヨウ素 125 シード線源の品質保証」

¹²⁵I線源強度計測課題検討ワーキンググループ；小島 徹¹，川村慎二^{*2}，大谷侑輝³，山田崇裕⁴，岡本裕之⁵，加茂前 健⁶，山下 修⁷，大下 崇⁸，黒澤忠弘⁹，脇谷雄一郎¹⁰，花田剛士¹¹，萬 篤憲¹²，浪花健太¹³，茂藤隆広¹⁴，長谷川軍司¹⁵，古畑 優¹⁶，藤井克尚¹⁷

¹埼玉県立がんセンター 放射線治療科

²帝京大学 大学院保健学研究科

³市立貝塚病院 放射線科

⁴近畿大学 原子力研究所

⁵国立がん研究センター中央病院 放射線品質管理室

⁶名古屋大学医学部附属病院 放射線科

⁷金沢医科大学病院 医療技術部 診療放射線技術部門

⁸東京慈恵会医科大学附属病院 放射線部

⁹産業技術総合研究所計量標準総合センター

¹⁰公益社団法人日本アイソトープ協会

¹¹慶應義塾大学医学部 放射線科学教室（治療）

¹²国立病院機構東京医療センター 放射線治療科

¹³株式会社千代田テクノ

¹⁴株式会社メディコン

¹⁵日本メジフィジックス株式会社

¹⁶アクロバイオ株式会社

¹⁷ユーロメディテック株式会社

Technical Report: Quality Assurance for ¹²⁵I Seed Sources in Permanent Prostate Brachytherapy

Working Group on Issues of I-125 Seed Dosimetric Assay; Toru KOJIMA¹, Shinji KAWAMURA^{*2}, Yuki OTANI³, Takahiro YAMADA⁴, Hiroyuki OKAMOTO⁵, Takeshi KAMOMAE⁶, Osamu YAMASHITA⁷, Takashi OOSHITA⁸, Tadahiro KUROSAWA⁹, Yuichiro WAKITANI¹⁰, Takashi HANADA¹¹, Atsunori YOROZU¹², Kenta NANIWA¹³, Takahiro MOTO¹⁴, Gunji HASEGAWA¹⁵, Yu FURUHATA¹⁶, Katsuhisa FUJII¹⁷

¹ Department of Radiology, Saitama Cancer Center

² Graduate School of Health Sciences, Teikyo University

³ Department of Radiology, Kaizuka City Hospital

⁴ Atomic Energy Research Institute, Kindai University

⁵ National Cancer Center Hospital

⁶ Department of Radiology, Nagoya University Hospital

⁷ Section of Radiological Technology, Kanazawa Medical University Hospital

⁸ Radiology Department, The Jikei University Hospital

⁹ National Metrology Institute of Japan

¹⁰ Japan Radioisotope Association

¹¹ Department of Radiology, Keio University School of Medicine

¹² Department of Radiation Oncology, National Hospital Organization Tokyo Medical Center

¹³ Chiyoda Technol Co., Ltd.

¹⁴ Medicon, Inc

¹⁵ Nihon Medi-Physics Co., Ltd.

¹⁶ Acrobio Corporation

¹⁷ EURO MEDITECH CO., LTD.

* 連絡著者 (corresponding author) 帝京大学大学院保健学研究科診療放射線科学専攻 [〒836-8505 福岡県大牟田市岬町6-22]
Division of Radiological Sciences, Graduate School of Health Sciences, Teikyo University, 6-22, Misaki-cho, Oomuta, Fukuoka
836-8505, Japan
E-mail: kawamura@fmt.teikyo-u.ac.jp

目 次

用語集

1. はじめに
2. 線源の品質保証
 - 2.1 線源数と形状の確認
 - 2.2 線源強度計測トレーサビリティ
 - 2.3 シングルシードアッセイ
 - 2.4 バッチアッセイ
 - 2.5 相対強度計測
 - 2.5.1 核医学用ウェル形電離箱（ドーズキャリブレーション）による相対強度計測
 - 2.5.2 サーベイメータによる相対強度計測
3. ^{125}I シードの線源情報
 - 3.1 セラAgX100（米国Theragenics Corporation製），線源型式：TheraAgX100
 - 3.1.1 セラAgX100線源の特性と納入方法
 - 3.1.2 セラAgX100の品質保証体制
 - 3.2 バード ブラキソース（米国BD製），線源型式：STM1251
 - 3.2.1 線源の特性と納入方法
 - 3.2.2 バード ブラキソースの品質保証体制
4. 測定機器
 - 4.1 HDR 1000 Plus（Standard Imaging社）
 - 4.2 SourceCheck 4Pi（PTW社）
 - 4.3 CRC-15BT（Capintec, A Mirion Medical Company社）
 - 4.4 IGC-8B（日本レイテック社）
5. 不確かさ評価
6. まとめ
7. 付録1. 海外における強度計測の現状
8. 付録2. アンケート結果

用 語 集

1) 基準空気カーマ率 **Reference Air Kerma Rate; $K_{\delta, R}$ RAKR**

線源を長軸および短軸方向に二分割した点から，1メートルの位置における空気中の基準空気カーマ率．シンボルの δ はカットオフエネルギーであり， ^{125}I シードでは5keVが使用される．単位は $\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ at 1mなどが用いられる．密封小線源治療の線源強度計測で用いられることが多い．

2) 空気カーマ強度 **Air Kerma Strength; S_K**

定義としては基準空気カーマ率とほぼ同じであるが，単位 ($\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) に距離が明示されることが異なる．国際標準となっている密封小線源治療の線量計算式では，空気カーマ強度が含まれるため，患者の線量計算で利用されることが多い．

3) 計測トレーサビリティ **Metrological Traceability**

不確かさを保持したまま国家計量標準に計測値がたどり着けること．国内における ^{125}I シードの線源強度計測では，基準空気カーマ率となる．

4) シングルシードアッセイ **Single Seed Assay**

線源一つ一つを繰り返し計測する方法を指す．個別計測とも呼ばれる．

5) (線源) カートリッジ **(Source) Cartridge**

患者に線源を留置する際に使用するアプリケーションに，装填する線源の容器．

6) 線源型式 **Source Model**

寸法や構造によって異なる線源の特性を表す学術的名称．TheraAgX100（セラジェニックス社）やSTM1251（BD社）．

7) 線源タイプ **Source Type**

患者治療で使用される線源の物理的形狀．線源本体と加工が施されたものがある．セラAgX100，セラストランド-SL（以上，セラジェニックス社）．バードブラキソース，ソースキャップ，クイックリンク，レディリンク（以上，BD社）．

8) 線源ホルダ **Source Holder**

ウェル形電離箱で線源やカートリッジを固定するために用いる治具．

9) 相対強度計測 **Relative Assay**

本稿ではトレーサビリティが担保されていない計測方法を指す．計測器の表示値を，施設におけるこれまでの値と比較することで，異常を発見する計測方法である．

10) ドーズキャリブレーション **Dose Calibrator**

核医学で使用される放射性医薬品の放射能を計測するウェル形電離箱．

11) バッチアッセイ **Batch Assay**

複数の線源を一度に計測する方法．カートリッジ単位で行われることが多い．バッチ計測やgrouped seed assayなどとも呼ばれる．

12) 明示放射能 **Apparent Activity; A_{app}**

自己吸収や減弱の無い点線源と仮定した場合の，BqやCiで表される放射能．国内で販売される ^{125}I シードの A_{app} は，11.0, 13.1, 15.3 MBqの三種類である．

This technical report provides useful information on the current status and issues of quality control in ^{125}I seed source strength measurement for Permanent Prostate Brachytherapy in Japan.

With the spread of ^{125}I seed brachytherapy, the traceability of source strength measurements with the single-seed assay was established in Japan. This allows medical facilities to measure reference air kerma rate of ^{125}I seeds with their own well-type of ionization chamber. However, it is difficult to maintain the traceability chain because the ^{125}I reference air kerma rate standards have been hardly utilized by medical facilities so far. Meanwhile, some serious incidents of contamination of the different source strengths and dead seeds were reported in Japan.

To address the specific issues in Japan, JASTRO Brachytherapy Subcommittee established a working group (WG) in 2021. The goal of this WG is to investigate the management methods of source strength measurement used in medical facilities, and to discuss the ideal and practicable methods of source management such as verifying the number of seeds and source strength. Initially, a questionnaire survey was conducted to facilities offering ^{125}I seed brachytherapy in Japan. Sixty-seven out of 95 facilities responded (response rate 70.5%). This survey revealed that 41% of facilities did not perform either confirmation of the number of seeds or measurement of source strength. There are several reasons why the source strength was not measured in those facilities. For example, ^{125}I seeds are provided under the sterilized conditions; quality assurance by source suppliers is reliable; and there is not sufficient staff.

The single-seed assay is regarded as an internationally standardized and the most reliable measurement method. Therefore, it is an essential measurement technique to ensure traceability of source strength measurements. However, our survey found that most Japanese facilities do not perform single-seed assays. Meanwhile, some facilities have performed batch assay as an alternative method, in which all of the multiple sources in a batch are measured while loaded into sterilized cartridges. Although the measurement by the batch assay is less accurate than the one by the single-seeded assay, the batch assay does not require re-sterilization of the source and can be performed quickly. It might be useful to detect unexpected errors such as differences in the number of sources and abnormalities in source strength.

In this report, we will introduce several methods of source strength measurement that have been implemented in medical facilities. The quality assurance of ^{125}I seed sources in prostate interstitial brachytherapy should be provided not only by the source suppliers but also by the medical facilities that use sources to treat patients. We hope that medical facilities will refer to this technical report and use it as an aid to quality assurance in their own facilities.

Keywords: ^{125}I seed, permanent prostate brachytherapy, source strength measurement, batch assay, quality assurance

1. はじめに

ヨウ素125シード線源（以下、 ^{125}I シード）を用いた前立腺癌密封小線源永久挿入治療（以下、シード治療）は、国内では平成15年（2003年）の放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（現、放射性同位元素等の規制に関する法律）の改正により、治療を目的とし体内に埋め込んだ ^{125}I シードが規制から除外され、急速に広まった¹⁾。国内からも良好な治療成績が報告されており^{2), 3)}、前立腺癌の標準治療の一つとなっている⁴⁾。

シード治療の品質保証の観点からは、挿入される線源の強度は保証されるべきものであり、米国のガイドラインでは「少なくとも10%、理想的には全数の線源を強度計測しなければならない」とされている⁵⁾。しかしながら、国内で承認された ^{125}I シードの線源強度は、公称値と実測値が良好な一致を示すとの報告が続いたこともあり^{6)~8)}、線源は一定の品質が確保できていると認識されてきた。そのため、国内のガイドライン^{9)~11)}では、医療施設での線源強度計測は必須項目とされていない。

一方で、2017年より国内で、線源強度の公称値から9%異なる線源の納入やデッドシードの混入などのインシデント事例が相次いで報告された^{12)~14)}。これらを受けて2021年に日本放射線腫瘍学会（以下、JASTRO）小線源治療部会では ^{125}I 線源強度計測課題検討ワーキンググループ（以

下、 ^{125}I 計測WG）を設置することとなった。 ^{125}I 計測WGでは、次の3つの課題について検討している。

1. 医療施設のユーザによる測定状況の把握
2. 国内流通線源における線源強度の品質保証体制
3. 医療施設ユーザによる線源数などの確認方法や強度計測のあり方の検討

このうち線源強度計測については、線源はカートリッジに装填され滅菌状態で供給されるなどの制約で、医療施設における計測が困難な状況である。また、国内の納入業者により品質保証体制が確立され¹⁵⁾、線源は一定の品質が確保されていると考えられる^{6)~8)}。よって、米国のガイドラインで示されるようなシングルシードアッセイを実施することは、近年発生した事象の防止に資する現実的かつ合理的な対応とは言い難い面がある。

このようななか、シングルシードアッセイに代わる有力な手法として、2.4及び2.5に後述するカートリッジに装填されたまま行うバッチアッセイや相対強度計測が近年注目されている。バッチアッセイはシングルシードアッセイと比較して、計測の不確かさは増大するものの、線源の再滅菌は不要であり、迅速に計測できる利点がある。実際に、自施設の計測値を時系列で比較する相対強度計測は、線源の検定日の間違いや、発注した線源強度との相違などの防止には有効と報告されている^{16)~21)}。小線源標準計測法18²²⁾では、シングルシードアッセイが国際的に標準化さ

表1 線源タイプと収納容器別に対応する線源数の確認法

線源タイプ	収納容器	目視	X線透視／撮影
・セラAgX100 ・セラストランド-SL	滅菌プリスターバック	滅菌バックのまま可 一部視認困難	滅菌バックのまま可
・クイックリンク ・レディリンク	金属製平板型 (クイックリンクカートリッジ, レディリンクカートリッジ用)	滅菌開封後に可	容器ごと撮影
・バード プラキソース滅菌タイプ ・クイックリンク	金属製円柱型 (ミック及びクイックリンクカートリッジ, 個包装と複数包装を含む)	滅菌開封後に可	滅菌開封後に可

れた信頼性の高い計測方法として、計量トレーサビリティを確保する観点から線源強度計測の基盤技術と位置付けられている。そのため、本稿ではシングルシードアッセイについても言及するが、より実務的な手法を中心に記載するなど、 ^{125}I 計測WGで検討してきた内容を基に、 ^{125}I シードの品質保証に関する国内の状況や、新たな知見を含む情報を技術報告書として取りまとめた。

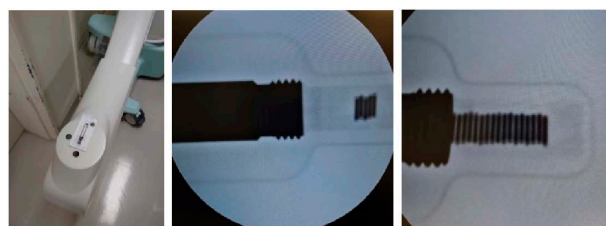
2. 線源の品質保証

過去には、納品伝票と一致しない線源数が納品された事例が報告された¹⁴⁾。これは製造販売業者が納入した線源数の誤りが原因であった。しかしながら、線源管理台帳と線源数が一致しない場合は、線源紛失や湧き出し線源と解釈されかねない。また、 ^{125}I を結合した銀線が入っていない不良線源(デッドシード)の混入¹²⁾や検定日の異なる線源が4施設6症例分納入された事例¹³⁾が報告された。これらは、JASTROから調査報告書が発出されており、現在は製造販売業者による再発防止策が講じられている。このような事例を使用前に検出するためには、ユーザによる線源数などの確認や線源強度計測が有用である。線源数の相違や形状の異常を発見した場合、および線源強度が計測値と公称値で許容値を超えて異なる場合などでは、担当医師と品質管理担当者でその影響を協議した上で、シード治療の可否を決定する。また、線源供給業者に事象の詳細を報告すべきである。次項からは、実務的な方法を中心に紹介する。

2.1 線源数と形状の確認

^{125}I シードを発注する際は、専用の発注書に納入日、線源数、線源強度(放射能)、線源タイプ、検定日などを記入する。納入時には発注書と納品伝票、遮蔽容器に貼付された仕様と照合して、誤りがないことを確認しなければならない^{9), 23)}。これらは患者治療に関わるだけでなく、法令に則った線源管理として求められる。

線源数と形状の確認方法として、目視、X線撮影装置または透視装置(以下、X線装置)によるX線撮影などがある。線源タイプごとに線源数や形状の確認が可能と考えられる組み合わせを表1にまとめた。使用室から線源を持ち



a) Cアーム照射口に設置
b) 透視画像 (線源5個の場合)
c) 透視画像 (線源20個の場合)

図1 セラAgX100の滅菌プリスターバックのX線透視による線源数の確認



a) Cアーム照射口に設置
b) 線源が20個の透視画像

図2 バード プラキソースが装填されたクイックリンクカートリッジのX線透視による線源数の確認

出す場合は、放射性同位元素等の規制に関する法律(以下、RI規制法)による使用区域の規制に抵触する恐れがあるため、各施設で使用条件を確認しなければならない。線源数と形状の確認は、滅菌状態を維持したまま行う必要がある。本来であれば、納品時に線源数や形状を確認すべきであるが、遮蔽容器に滅菌状態で梱包されて、治療直前まで開封が禁止されている線源タイプもある。そのような線源は、線源埋め込み用アプリケーションに装填する際に、カートリッジの目盛りや、プランジャの高さを目安として、線源数の把握に努めるべきである。

カートリッジをX線装置で撮影することで、線源数や形状の確認を記録に残すことができる。撮影した画像(X線画像)による線源の視認性は、X線装置の性能、管電圧やフィルタの配置などに依存するため、撮影条件の最適化を図る必要がある。セラAgX100の滅菌された硬質プラス

チック容器（プリスターパック）は、遮蔽と運搬の用途を兼ねる収納容器から取り出してもプリスターパックの内部は滅菌が保持される。そのため、パックを直にX線装置に設置して透視や撮影することで個々の線源を観察できる。ただし、カートリッジに装填される線源数が多いと、カートリッジの金属部と線源が重なり、線源数や形状の判別が困難となる（図1）。平板型の収納容器で納入されるBecton, Dickinson and Company（以下、BD社）製のクイックリンクカートリッジは、箱に封入されたままX線画像を取得することで、線源一つ一つを視認できる（図2）。一方、円柱型の収納容器はミックカートリッジが円柱周囲に収納される構造で、X線透視で線源が重なってしまうため線源数と形状の確認は困難である。図1、図2ともに、フラットパネルディテクタを有するX線装置による画像であり、イメージインテンシファイア方式の装置では、線源の識別が困難なことがある。

2.2 線源強度計測トレーサビリティ

^{125}I シードの強度計測において、国家標準にトレーサブルな計測値は、基準空気カーマ率 $\dot{K}_R$ である。基準空気カーマ率は、真空中における線源から d m（通常は1 m）離れた位置における空気中の空気カーマ率（ $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ at 1 m ま

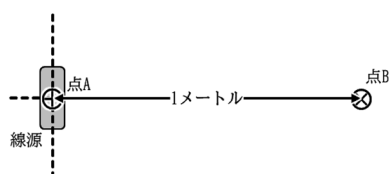


図3 基準空気カーマ率 (Reference Air Kerma Rate) の定義
基準空気カーマ率は、真空中における線源を長軸方向に二分した、線源と直交する横断面における線源中心（点A）から d m（通常は1メートル）離れた位置（点B）における、空気中の空気カーマ率である。点Aと点Bの間の空気によって生じる散乱と吸収による減弱は、補正されるため、真空中の空気カーマとも言える。

たは距離を含めて $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^2$ ）である（図3）。基準空気カーマ率は空気カーマ強度 S_K （ $\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ）と単位を揃えれば、同値となる。基準空気カーマ率とBqやCiで表示される明示放射能 A_{app} との関係は、次式で表される。

$$A_{\text{app}} = \Gamma \cdot \dot{K}_R \quad (\text{式1})$$

ここで、 Γ は空気カーマ率定数（SI単位で $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1}$ 、低線量率密封小線源の実用上の単位は $\text{cGy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{MBq}^{-1}$ ）であり、 ^{125}I 線源（シードに限らない）では0.0343から0.0358 $\text{cGy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{MBq}^{-1}$ の範囲であり、0.0343（旧表記の単位では、1.270 $\text{cGy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mCi}^{-1}$ ）が最も用いられる^{24)~27)}。

基準空気カーマ率の計測は空気中で行われるため、空気による吸収や散乱は補正される。 ^{125}I シードの絶対計測には、以下の2つの手法があり、国内では国家計量標準機関である産業技術総合研究所（Advanced Industrial Science and Technology, 以下、AIST）が実施している。

(1) 薄膜対向型自由空気電離箱による計測^{22), 28)~30)}

^{125}I シードから放出されるガンマ線や特性X線のエネルギーと同程度の管電圧50 kV以下のX線場で、自由空気電離箱による空気カーマを計測できる。この計測手法を応用したのが、図4に示す薄膜対向型自由空気電離箱である。1個の線源からの空気カーマ率は微小なため、電離電流量を増加させる目的で数百 cm^3 程度と大きな電離容積を有する電離箱を使用する。

(2) 軟X線場で校正された空洞電離箱による計測

大容量（1000 cm^3 など）の空洞電離箱を軟X線場で校正し、軟X線のエネルギー特性と ^{125}I シードのエネルギースペクトル情報を基に、換算式を用いて基準空気カーマ率を算出する方法である。間接的な手法であるが、大容量の空洞電離箱を用いるため、安定した電離電流を計測できる利点がある。

これらの手法で基準空気カーマ率を評価する際に重要なものが、エネルギースペクトルの情報である。線源から放出される光子はエネルギーが低いため、線源の形状や被

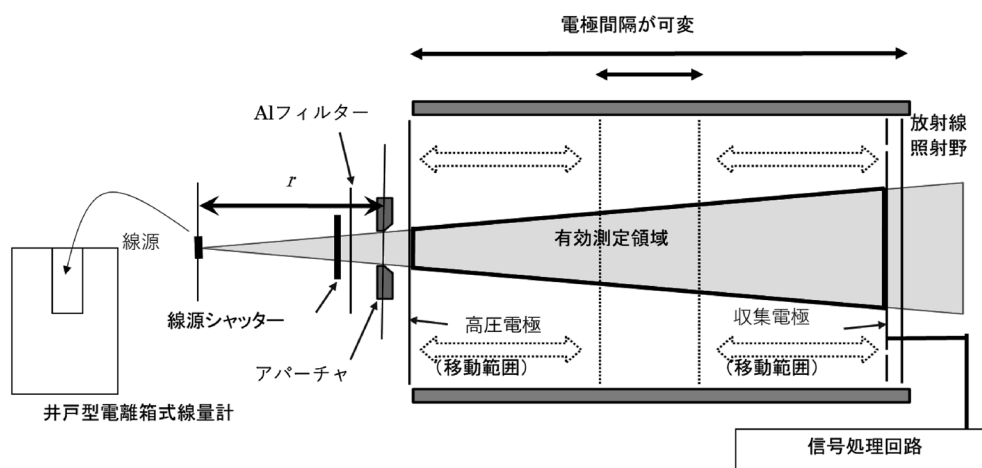


図4 薄膜対向型自由空気電離箱の概略図

覆容器の材質と厚みによって、エネルギースペクトルが異なる。そのため、線源型式ごとにスペクトルを考慮した基準空気カーマ率を評価する必要がある。

(3) 特定標準器による特定二次標準器の校正の方法

上記 (1) または (2) によるトレーサブルな条件で基準空気カーマ率が計測された¹²⁵Iシード（仲介器）を用いて、特定二次標準器で表示値を得る。表示値と基準空気カーマ率の比から校正定数を決定する。

(4) 国内における線源強度計測トレーサビリティの現状と課題

シード治療が開始された当初、国内では¹²⁵Iシードの基準空気カーマ率の国家計量標準は整備されていなかった³¹⁾。そのため、ウェル形電離箱式線量計（以下、ウェル形電離箱）の校正は、海外の機関に依頼されていた。その後、国内でも¹²⁵Iシードの基準空気カーマ率の国家計量標準が整備され、2010年より標準供給が開始された。二次校正事業者である日本アイソトープ協会（Japan Radioisotope Association. 以下、JRIA）による校正サービスは、ウェル形電離箱の校正と校正された（基準空気カーマ率が値付けされた）¹²⁵Iシードの供給という、二つのシステムで提供されていた。これにより、ウェル形電離箱を用いたシングルシードアッセイ法によるトレーサビリティが担保された¹²⁵Iシードの基準空気カーマ率を、医療施設で計測できるようになった。しかしながら、2009年から2018年までの10年間で、基準空気カーマ率が値付けされた標準線源の供給は3件、線量計校正は11件ときわめて少ない利用状況であった。そのため、標準線源の供給と線量計校正サービスはともに現在は停止されているが、シード治療の品質保証の観点から、国内における¹²⁵Iシードの計量トレーサビリティは継続されるべきである。

2.3 シングルシードアッセイ²²⁾

シングルシードアッセイ (single seed assay) とは、カートリッジから取り出した¹²⁵Iシードを一つずつ計測する方法であり、トレーサビリティの担保された計測手法を用いれば、基準空気カーマ率を計測できる。シングルシードアッセイの具体的な計測方法は、書籍を参照いただきたい^{11), 22)}。

シングルシードアッセイは、個々の線源強度を評価するには、計測の信頼性が最も高い方法である。一方で、治療用として利用される¹²⁵Iシードの計測にはいくつか課題がある。計測した線源を患者治療で使用するには、滅菌処理が必要となる。しかしながら、セラAgX100は再滅菌が禁止されている。バード ブラキソースは再滅菌が禁止されていないものの、¹²⁵Iシードをミックカートリッジに装填して金属製容器に設置して滅菌しなければならない、線源の紛失や破損の危険性がある。また、滅菌を行う者は放射線源を取り扱うため、放射線業務従事者として登録が必要となる。診療放射線技師や医学物理士では、滅菌処理の知識が十分とはいえず、不慣れな者が取り扱うこととなる。反対に滅菌の知識や経験が豊富な者は、放射性同位元素を取り扱う経験がほとんどないことに加え、放射線業務従事者としてRI規制法に沿った教育・訓練・被ばく管理などが求められることとなる。計測に使用した線源を余剰線源として取り扱う場合は、RI規制法等に添った貯蔵や廃棄などの放射線管理が求められるとともに、診療報酬を計上できないために施設の出費となる。さらに線源の廃棄にも引取費用が発生する。このように、国内の医療施設においてシングルシードアッセイを行うことは、困難な状況が続いている。

2.4 バッチアッセイ

一度に複数の線源を強度計測する方法をバッチアッセイ (batch assay) またはgrouped seed assayと呼ぶ。バッチアッセイの方法は様々あるが、ここでは、ウェル形電離箱を用いたトレーサビリティが担保された計測法を紹介する。この方法は、滅菌状態を維持したままカートリッジごとの計測が可能である。本法は患者治療前の線源強度確認として、再滅菌が不要、線源の紛失リスクが少ない、測定者の被ばくや作業負担が少ない、計測用線源の購入が不要などの臨床における実施面と、計測の信頼性の観点から、バランスのとれた方法として普及が期待されている。

必要な計測器は、シングルシードアッセイが可能な校正されたウェル形電離箱と、線量計に付属³²⁾ または自作⁶⁾ したカートリッジの保持具（以下、線源ホルダ）である。後述する補正係数を乗算することで、トレーサビリティの



図5 ウェル形電離箱HDR 1000 Plusの外観と使用機器
左：ウェル形電離箱，右：線源ホルダ72307とクイックリンクカートリッジ

担保された基準空気カーマ率を計測できる。

ここでは図5に示すHDR 1000 Plusおよび72307パードクイックリンク/ミック線源ホルダ(ともにStandard Imaging, Inc.)を用いて、個包装されたクイックリンクカートリッジを計測する例を紹介する。個包装の滅菌袋に封入されたままのクイックリンクカートリッジを線源ホルダに設置する。再現性向上を目的にカートリッジホルダに対するカートリッジの方向および高さを一定にして、15秒間計測する。得られた線量計の表示値 M から、次式により1mの距離における基準空気カーマ率 $\dot{K}_{\delta, R}$ ($\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)を求める。

$$\dot{K}_{\delta, R} = M \cdot k_{\text{GEO}} \cdot N_K \cdot k_{\text{TP}} \cdot k_A \cdot k_{\text{elec}} \quad (\text{式2})$$

したがって、線源1個当たりの平均基準空気カーマ率 $\bar{K}_{\delta, R}$ は、次式で求まる。

$$\bar{K}_{\delta, R} = (M \cdot k_{\text{GEO}} \cdot N_K \cdot k_{\text{TP}} \cdot k_A \cdot k_{\text{elec}}) / N \quad (\text{式3})$$

ここで、式中の記号は下記の通りである。

k_{GEO} : カートリッジに装填された線源数に応じた電離箱表示値の変化を補正する係数

N_K : 空気カーマ校正定数

k_{TP} : 温度気圧補正係数

k_A : 大気圧(高度)補正係数

k_{elec} : 電位計校正定数

N : カートリッジに装填されている線源数

k_{GEO} は、クイックリンクカートリッジに20個の線源が装填されている場合は、1.307とHDR 1000 Plusに付属するマニュアル³²⁾に例示されている。しかしながら、線量計、カートリッジ、線源タイプ、線源ホルダなどに依存することが考えられるため、各施設で導出することが望ましい。 k_A は高地で大気圧が低い条件では、 ^{125}I シードからの光子で発生した二次電子が電離箱外側のアルミ壁で後方散乱することで生じる表示値の過剰応答を補正する係数である^{33), 34)}。

本法の課題として、2.2で述べた通り日本国内における空気カーマ校正定数 N_K の提供が停止しており、国外の校正事業者へ依頼しなければならないことや、カートリッジホルダが全ての線源タイプやカートリッジに対応していないこと、 k_{GEO} に対する不確かさの評価方法が確立していないこと、複数の線源をまとめて計測するためデッドシードの検出能が線源数に依存すること⁶⁾などが挙げられる。

2.5 相対強度計測

相対強度計測はトレーサビリティが担保された基準空気カーマ率(空気カーマ強度)や、MBqやCiで表される放射能を計測から求めることはできない。したがって、自施設の計測値を基準として相対比較で評価することになり、

計測の信頼性としては、上記までのトレーサビリティの担保された方法よりも低下する。しかしながら、患者治療に影響を与えるような複数個のデッドシード、納入された線源数の間違い、検定日が1週間以上異なる線源の納入などに対しては、有効な方法と考えられる。異常値の判定には、ヒストグラムやシューハート管理図の利用も有効であり、運用においては使用する計測器による繰り返し再現性などの特性を事前に確認しておく必要がある(「5. 不確かさ評価」参照)。また、計測器の経時的な感度変化にも注意する必要がある。得られた測定結果が継続して有効であることを確保するため、定期的に事業者で計測器を校正するか、基準値を求めると同時に一定の測定器—線源の幾何学的配置で指示値を得て、同一条件で一定期間後測定し、指示値の差が許容範囲を超えていないことを確認するのがよい^(注1)。ここで用いる線源は標準線源である必要はなく実用のチェックング線源でよい。表示値が許容範囲を超えて変化した場合は、製造業者の点検を受けた上で校正するか、適切に測定値を補正することが推奨される。この際、必要に応じて基準値の更新を検討すべきである。

ここでは核医学で利用されるウェル形電離箱(ドーズキャリブレーション)とサーベイメータを用いる方法を紹介する。他にも専用の器具を使用した方法が提案されている^{16)~21)}。

2.5.1 核医学用ウェル形電離箱(ドーズキャリブレーション)による相対強度計測

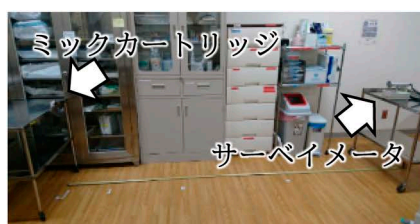
核医学用ウェル形電離箱とは、核医学の放射性医薬品の放射能測定に用いるドーズキャリブレーションを指し、 ^{125}I シードに対する空気カーマ校正定数が与えられていない線量計である。ここではウェル形電離箱(IGC-7, 日立アロカ(株)、現日本レイテック(株))でクイックリンクカートリッジを計測する方法を例示する。本手法は滅菌された収納容器から取り出して操作するが、滅菌状態を維持したまま取り扱うことが求められる。カートリッジは滅菌された透明なチャック付きポリ袋に入れて、内側は滅菌状態を保持、外側は滅菌が解除されたものとして取り扱う。ポリ袋はカートリッジごとに新しいものに交換する。試料ホルダにカートリッジを固定するため、外部照射で用いる頭頸部固定用のシェルで線源ホルダを自作した(図6)。線源の装填されていない側のカートリッジ端部を線源ホルダに固定させ、くわえて試料ホルダと電離箱に付けた印を毎回一致

(注1) この手法は、放射線防護・管理のための線量当量(率)測定器に適用されるJIS Z 4511 X線及び γ 線用線量(率)測定器の校正方法付属書JB「実用測定器の簡素化した校正及び機能確認」に機能確認として規定されている。また、放射線防護・管理に用いる線量当量(率)サーベイメータは、RI法施行規則の第20条では、「放射線測定器については、点検及び校正を1年毎に適切に組み合わせて行うこと」とされている。用いる測定器が本規則に従い定期的に点検及び校正がされているものであれば、相対強度測定を行う上での測定結果の継続的な有効性も確保されることが見込まれる。



線源	バード プラキソース
カートリッジ	リンクカートリッジ
電離箱	IGC-7
線源ホルダ	バイアル用ホルダに熱可塑性樹脂である固定シ ェルで作成した保持具
電位計	IGC-7 の構成システムの一部
滅菌状態	リンクカートリッジを滅菌したチャック付きポリ 袋に入れて計測。 カートリッジは滅菌状態を維持し、ポリ袋の外側は 解除となる。カートリッジごとにポリ袋は新しいも のに交換。

図6 ウェル形電離箱 IGC-7 による測定の様子
左：測定状況，右：線源ホルダに設置されたカートリッジ



線源	セラ AgX100
カートリッジ	ミックカートリッジ
電離箱	シンチレーションサーベイメータ TCS-173
線源ホルダ	カートリッジに装填された線源がサーベイメータに 正対するよう、ピンチで直立に固定。
滅菌状態	ブリスターパックのまま計測するため、滅菌は保持。

図7 サーベイメータによる相対強度計測の様子
上：測定環境，下：セラ AgX100 のブリスターパックをクリップで固定

させることで、カートリッジの位置再現性を担保した。読み値の繰り返し再現性は2%程度と見積もっている。また、IGC-7の開口径はセラ AgX100のブリスターパックよりも大きいので、開封せずに計測できる。

評価基準となる値は、10例程度の測定結果から平均値および標準偏差を求めたものを採用した。基準値と計測値との乖離を評価する。70例以上の計測結果から、基準値からの乖離が±3%以上は10%のカートリッジで確認され、±5%以上の乖離を示したカートリッジはなかった。5個のカートリッジで計測に要する時間は10分程度であり、実用的な方法である³⁵⁾。

2.5.2 サーベイメータによる相対強度計測

前立腺シード治療を受けた患者の退出基準の計測にも多用されるシンチレーションサーベイメータを用いて、滅菌ブリスターパックに封入されたままのセラ AgX100を計測する方法を紹介する。サーベイメータの有感部とカートリッジの位置関係が、計測値に与える影響を抑えるため、線源からサーベイメータまでの距離は2.5から3m程度離

して設置する(図7)。距離を離すことで表示値が小さくなるため、まず治療室に計測しない他の線源がないこと、次にバックグラウンドを計測し通常の値と変わらないことを確認する。サーベイメータの表示値が最大となるよう、大型のクリップでブリスターパックを垂直に立てて、カートリッジ内の線源をサーベイメータに正対させる。サーベイメータの時定数を10秒として、1分間ほど計測する。

まず基準値の取得のため、サーベイメータの表示値から、サーベイメータ換算係数 k_{survey} を導出する。 k_{survey} は、カートリッジに装填される線源数に応じたサーベイメータの表示値の変化を補正する係数であり、下式を用いて複数回の平均値 M から求める。

$$k_{\text{survey}} = (A \cdot G \cdot N) / M \quad (\text{式4})$$

ここで、式中の記号は下記の通りである。

A: 計測時の線源強度(おもに MBq や Ci で表される明示放射能)

G: 距離の逆二乗則による減衰補正(毎回同じ位置で計

測すれば不要)

N : 線源数

M : サーベイメータの平均表示値

治療に使用する線源の放射能計測値 A_{meas} は、下式で求める。

$$A_{\text{meas}} = (M \cdot k_{\text{survey}}) / (G \cdot N) \quad (\text{式5})$$

A_{meas} は計測した日時における放射能である。検定日から計測日時までの減衰を補正した線源強度 A を算出し、 A_{meas} との乖離で評価する。

セラAgX100やセラストランド-SLを、滅菌プリスターパックのまま計測できる。バードブラキソースのソースキャップタイプやクイックリンクは、カートリッジを滅菌された袋に封入するか、クリップと計測場所の周囲を滅菌ドレープで覆うことで、滅菌状態のまま計測が可能となる。32個のカートリッジの計測結果から、基準値から3%以上の乖離は8個、5%以上は1個であった。機器の設置から20分程度で、使用する全てのカートリッジを計測できる³⁶⁾。

3. ^{125}I シードの線源情報

国内では、セラジェニックス社(Theragenics Corporation)製とBD社製(ともに米国)の ^{125}I シードを利用できる。線源を挿入する手技や組み合わせて使用する機器によって、線源の納入方式も異なる。

3.1 セラAgX100 (米国Theragenics Corporation製), 線源型式: TheraAgX100^{37), 38)}

3.1.1 セラAgX100線源の特性と納入方法(表2)

セラAgX100は銀製短線の表面に化学的に ^{125}I が結合されており、純チタン製カプセルに密封されている。セラAgX100の外形は長径4.5mm、直径0.8mmである。生体吸収性のポリグラクチン910で作られた編み糸でセラAgX100が被覆されたものが、セラストランド-SL(製品名称, TheraStrand-SL)である。編み糸も含めると、線源の外形は長径6.0mm、直径1.0mmとなる。セラAgX100とセラストランド-SLともに線源はミックカートリッジに装填され、セラAgX100は1カートリッジあたり1, 2, 3, 4, 5および20個入り、セラストランド-SLは1カートリッジあたり1, 2, 3, 4, 5および15個入りとなる。

線源は強度と発注した線源数ごとにミックカートリッジに装填され、片面がカートリッジの形状に成型されたプリスターパックに封入される。プリスターパックごと滅菌されており、開封しなければ内部の滅菌は保持される構造である。セラAgX100とセラストランド-SLともに、再滅菌は禁止されている³⁷⁾。

3.1.2 セラAgX100の品質保証体制

米国セラジェニックス社にて、線源の製造時に全ての線源で強度が計測されて、強度ごとに振り分けられる。線源はISO 9978³⁹⁾に則って製造される。出荷前にあらためて一つ一つの線源を強度計測して、その結果を図8の独立強度計測結果(Independent Assay Results)として、ユーザーに提供している。線源はプリスターパックに封入された状

表2 線源の納入種別に対応する線源数と形状の確認法

線源タイプ	カートリッジ名 アプリケーション/ローダ	納入方法	再滅菌
セラ AgX100	 ミックカートリッジ	 線源はミックカートリッジに装填。	不可
	 ミックアプリケーション		
	 アイソローダ システム		
セラストランド-SL	 ミックカートリッジ	 カートリッジは片面が整形された硬質プラスチック容器(プリスターパック)に封入され、内部は滅菌されている。	不可
	 ミックアプリケーション		

THERAGENICS CORPORATION®

INDEPENDENT ASSAY RESULTS

Seed Model: AgX100
Seed Manufacturer: Theragenics Corporation

Distributor Name: Nihon Medi-Physics
Distributor Order Number: 10番号 ラベル記載
Manufacturer Order Number:

Number of Seeds Measured: 84

Assayed Activity		Reference Date Adjusted: 2017/06/16 (JST)	
mCi	MBq	mCi	MBq
Average: 0.386	14.3	0.35	12.9

RESULTS:
The mean of this assay was within 5% of the manufacturer's certificate mean: YES
Each seed assayed was within 6% of the manufacturer's certificate mean: YES

Completed by / Date: 測定者サイン 日付

Manufacturer's Certification
Reference Date: 2017/06/16 (JST)
Mean Seed Activity
mCi MBq
0.35 13.1

Capintec S/N: 77394
Operator: Pamela Millisp
Assay Date: 2017/06/07
Assay Time: 09:53:44 AM

測定日時
(米国東海岸時間)

測定値の平均が工場保証値の±5%以内である: YES
各線源の測定値が工場保証値の±6%以内である: YES

The reported results were evaluated in accordance with the recommended criteria established by the AAPM Low Energy Brachytherapy Source Calibration Working Report (Reference: WM Butler et al, "Third Party brachytherapy source calibrations and physicist responsibilities: Report of the AAPM Low Energy Brachytherapy Source Calibration Working Group", Med Phys 35, 3860-3865 (2008)) for verifying source strength by performing an assay of at least 10% of the seeds in the order, ensuring the mean of measurements was within 5% of the stated certificate mean and that the result of each single seed of the sample was within 6% of manufacturer's certificate mean.

This assay was performed using a well chamber calibrated with direct traceability to the National Institute of Standards and Technology (NIST) and the Accredited Dosimetry Calibration Laboratories (ADCL) at the University of Wisconsin - Radiation Calibration Laboratory. This verification was performed independently from the assay referenced by the Certificate of Calibration.

Form # F1042-A Page 1 of 2

THERAGENICS CORPORATION®

全てのシード線源の測定結果 (実測値、検定日換算値)

Distributor Order Number: 10番号 ラベル記載 Manufacturer Order Number:

Seed #	Assayed Activity		Reference Date Adjusted: 2017/06/16 (JST)	
	mCi	MBq	mCi	MBq
1	0.361	14.1	0.345	12.8
2	0.399	14.8	0.361	13.4
3	0.382	14.1	0.348	12.8
4	0.398	14.7	0.360	13.3
5	0.395	14.6	0.357	13.2
6	0.378	14.0	0.342	12.7
7	0.391	14.5	0.354	13.1
8	0.405	15.0	0.368	13.8
9	0.381	14.1	0.345	12.8
10	0.396	14.7	0.358	13.3
11	0.383	14.2	0.347	12.8
12	0.391	14.5	0.354	13.1
13	0.371	13.7	0.336	12.4
14	0.391	14.1	0.345	12.8
15	0.393	14.6	0.356	13.2
16	0.385	14.2	0.348	12.9
17	0.392	14.5	0.355	13.1
18	0.377	13.9	0.341	12.6
19	0.380	14.1	0.344	12.7
20	0.379	14.0	0.343	12.7
21	0.382	14.1	0.346	12.8
22	0.383	14.2	0.347	12.8
23	0.393	14.6	0.358	13.2
24	0.388	14.4	0.351	12.9
25	0.386	14.3	0.349	12.9
26	0.379	14.0	0.343	12.7
27	0.393	14.5	0.358	13.2
28	0.381	14.1	0.345	12.8
29	0.370	13.7	0.335	12.4
30	0.382	14.1	0.346	12.8
31	0.377	13.9	0.341	12.6
32	0.383	14.2	0.347	12.8
33	0.377	13.9	0.341	12.6
34	0.360	13.7	0.334	12.4
35	0.404	14.9	0.366	13.5
36	0.382	14.1	0.346	12.8
37	0.398	14.4	0.361	13.0
38	0.377	13.9	0.341	12.6
39	0.382	14.1	0.346	12.8
40	0.395	14.6	0.357	13.2
41	0.384	14.2	0.347	12.8
42	0.397	14.7	0.359	13.3
43	0.383	14.2	0.347	12.8
44	0.403	14.9	0.365	13.3
45	0.383	14.2	0.347	12.8
46	0.382	14.1	0.346	12.8
47	0.378	13.8	0.338	12.5
48	0.390	14.4	0.353	13.1
49	0.377	13.9	0.341	12.6
50	0.369	13.7	0.334	12.4
51	0.388	14.4	0.351	12.9
52	0.391	14.1	0.345	12.8
53	0.382	14.1	0.346	12.8
54	0.384	14.2	0.347	12.8
55	0.378	14.0	0.342	12.7
56	0.358	14.6	0.357	13.2
57	0.377	13.9	0.341	12.6
58	0.381	14.1	0.345	12.8
59	0.391	14.5	0.354	13.1
60	0.387	14.7	0.358	13.3
61	0.398	14.7	0.369	13.3
62	0.379	14.0	0.343	12.7
63	0.382	14.5	0.358	13.1
64	0.398	13.5	0.351	12.3
65	0.403	14.9	0.365	13.5
66	0.391	14.5	0.354	13.1
67	0.378	14.0	0.342	12.7
68	0.377	13.9	0.341	12.6
69	0.382	14.5	0.358	13.1
70	0.382	14.5	0.358	13.1
71	0.380	14.1	0.344	12.7
72	0.369	13.7	0.334	12.4
73	0.377	13.9	0.341	12.6
74	0.403	14.9	0.368	13.5
75	0.400	14.8	0.362	13.4
76	0.387	14.3	0.350	13.0
77	0.383	14.2	0.347	12.8
78	0.398	14.4	0.361	13.0
79	0.372	13.8	0.337	12.3
80	0.391	14.5	0.354	13.1
81	0.398	14.8	0.361	13.4
82	0.383	14.5	0.358	13.2
83	0.383	14.2	0.347	12.8
84	0.385	14.2	0.348	12.9
Average	0.386	14.3	0.349	12.9

Form # F1042-A Page 2 of 2

図8 セラジェニックス社製線源に同梱される独立強度計測結果 (Independent Assay Results)

左：発注した線源の仕様と計測した線源強度の平均値などが記載、右：線源個別の計測値と検定日に換算した線源強度が記載

態で、日本に向けて出荷される。

国内での品質保証は、日本メジフィジックス株式会社の兵庫工場にて、外観検査や数量などを確認する。あわせて薬機法で必要な作業を行い、関連書類を同梱して医療施設に出荷している。

3.2 バード ブラキソース (米国BD製)、線源型式: STM1251^{(40), (41)}

3.2.1 線源の特性と納入方法 (表3)

SMT1251は、純チタン製のカプセルに¹²⁵Iを吸着させたアルミニウムワイヤが密封された構造である。X線透視によりアルミニウムワイヤの中心に埋め込まれた金マーカを視認できる。未滅菌の線源を購入できないが、ミックカートリッジに線源を装填して、遮蔽を兼ねる金属製の円柱形外容器に設置すれば、再滅菌できる。

線源の供給はミックカートリッジ、クイックリンクカートリッジ、およびレディリンクがある。さらにミックカートリッジでも、線源が裸のまま装填されるものとポリ乳酸製の生体吸収材で線源の両端を挟み込んだソースキャップのタイプがある。ミックカートリッジには線源のまま装填されれば最大20個、ソースキャップでは15個まで装填できる。

クイックリンクカートリッジは、線源と生体吸収剤を連結させるクイックリンクローダと呼ばれる装置とともに用いるタイプで、装填される線源は裸のSTM1251である。レディリンクは、プレプランで決定した配置を基に、あらかじめ線源と生体吸収剤が連結されたタイプである。BD社の個別包装された線源を除く製品は、遮蔽容器を兼ねる運搬容器ごと滅菌されているため、治療直前まで開封が禁じられている。

3.2.2 バード ブラキソースの品質保証体制

米国の製造工場では、品質保証体制として全ての線源で、ISO 9978の5.1.1. 温水浸せき試験による漏出試験および汚染試験⁽³⁹⁾を行っている。線源は製造時に、米国標準技術局 (National Institute of Standards and Technology; NIST) で校正されたウェル形電離箱で全数を自動計測する。計測した線源強度の公称値からの乖離の許容範囲は±5%であり、測定結果は線源に同梱される (図9)。線源は各検定日の線源強度と紐づけられ、バイアル瓶で管理される。受注後は、受注内容に基づいた検定日と合致する強度の線源をバイアル瓶から受注数量を抽出して、カートリッジに装填する。つづいて滅菌工程を経て日本へ出荷される。挿入後の脱落に備えて、専用の金属製の回収容器も同梱される。

表3 線源の納入種別に対応する線源数と形状の確認法

線源タイプ	カートリッジ, アプリーケータ/ローダ	納入方法	再滅菌
ブラキソース	ミックカートリッジ	症例ごとの納入 ステンレス製円柱型容器に1〜7個のカートリッジを 設置	ブラキソースは滅菌タイプは複数型ステンレス円柱型容器に設 置すれば可
ソースキャップ	ミックアプリーケータ	個別包装で納入 ステンレス製円柱型容器に1個のみカートリッジを 封入 カートリッジは滅菌されたポリ袋で梱包	ソースキャップは吸収性素材が高圧蒸気で溶解するため不可
クイックリンク	クイックリンクカートリッジ クイックリンクローダ リリースシステム(下図)	症例ごとの納入 ステンレス製平板型に1〜7個のクイックリンクカー トリッジを並列配置	ミックカートリッジに装填して、複数型ステンレス円柱型容器 に設置すれば可能
レディリンク	リレーアプリーケータ(外套)と リリーススタイルット(内套針)	ブリスクリプショントレイ(左図、プレプランでの 線源配置の通りに吸収性素材と連結されている) スタンダードトレイ、バリアブルトレイもある。	吸収性素材が溶解するため不可

4. 測定機器

¹²⁵Iシードの計測に使用できるウェル形電離箱を表4に示す。

4.1 HDR 1000 Plus (Standard Imaging社)

高線量率密封小線源の基準空気カーマ率の計測にも用いられ、国内で広く利用されている。線源ホルダは、シングルシードアッセイ(ホルダタイプ:70016)、複数線源を集めた一括計測(同:70022)、ミックカートリッジ(同:70024,72307)とリンクカートリッジ(同:72307)、と多くの線源タイプに対応できるよう用意されている。

70016シングルLDRシード線源用ホルダは、シングルシードアッセイに用いるホルダで、セラAgX100とバードブラキソースともに対応する。70022複数シード測定ツールは、500個までの¹²⁵Iや¹⁰³Pdのシード線源を一度にまとめて測定できる。70016と70022は滅菌パックを開封し、カートリッジから取り出した裸の線源を計測するためのホルダである。これらの線源ホルダはともに滅菌できない仕様であり、余剰線源を使用するか線源の再滅菌が必要となる。

70024ミックカートリッジ線源用ホルダは、ホルダ自体を滅菌できる仕様である。よって、測定環境を滅菌状態にできれば、滅菌パックから取り出したミックカートリッジであっても、滅菌を破棄せずに線源強度を計測できる。72307バードクイックリンク/ミックカートリッジ用線源ホルダは、1個ずつ遮蔽容器に梱包されたクイックリンクカートリッジやBD社のミックカートリッジを、滅菌状態

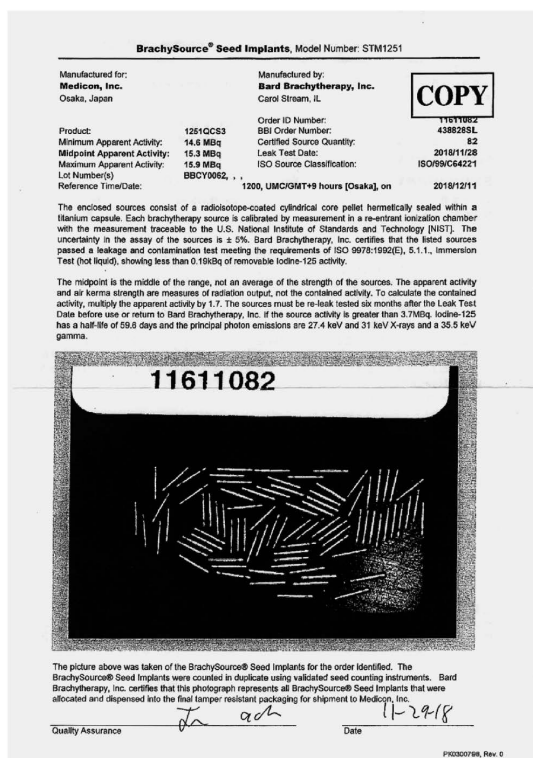
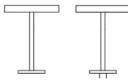


図9 BD社製線源に同梱される強度計測結果
上段に発注した線源の仕様、下段にカートリッジに装填する
線源数を撮影した外観画像を貼付

国内での品質保証は、線源が物流センターに到着した際に、線源数や装填方法などの構成および同封された保証書と受注内容を照合して誤りがないことを確認する。あわせて薬機法で必要な作業を行い、関連書類を同梱して医療施設に出荷している。

表4 線源の納入種別に対応する線源数と形状の確認法

				
製品名	HDR 1000 Plus	SourceCheck 4Pi	CRC-55tR	IGC-8B
製造会社 (製造国)	Standard Imaging (米国)	PTW Freiburg (ドイツ)	Capintec, A Mirion Medical Company (米国)	日本レイテック (旧, 日立アロカ) (日本)
検出気体の様式	常圧空気 (通気形)	常圧空気 (通気形)	アルゴンガス封入 (密閉形)	アルゴンガス封入 (密閉形)
電離箱部の開口径 (直径)	3.5 cm ^{*1}	3.2 cm	7.0 cm	4.4 cm
シングルシードホルダ	 70016 ADCL 校正が可能	 Single seed adapter T33005.1.100	 Linear Seed Tube 0976-0003	
カートリッジホルダ	 左: 70024 ミックカートリッジ用 ^{*2} 右: 72307 リンク/ミックカートリッジ用	なし	 左: 5120-2244 ミック用 右: 5120-2252 クックリンク用	なし
その他ホルダ	 70022 裸の複数線源をまとめて計測	ストランド状や Nucletron seedSelectron に 対応するホルダのみで、国内に流通する 線源に対応するホルダはない	なし	なし
備考	*1: 線量計本体の開口径がセラ AgX100 やセラストランド-SL のプリスターパックより小さいため、滅菌パックから取り出して計測。 *2: 70024 ホルダはそれ自体が滅菌できるため、ミックカートリッジも線源滅菌が担保された状態で計測できる。 開口径がセラ AgX100 のプリスターパックより小さいため、滅菌パックから取り出して計測。 セラ AgX100 のプリスターのまま計測できる。 セラ AgX100 のプリスターのまま計測できる。			

で梱包されたポリ袋を開封せずに計測できる。72307ホルダとクックリンクカートリッジで、滅菌状態のまま計測する方法を2.4に記載した。

セラ AgX100 とセラストランド-SL の滅菌プリスターパックは、HDR 1000 Plus の開口径 (直径 3.5 cm) よりも大きいので、そのままでは計測できず、開封して取り出す必要がある。よって、カートリッジを滅菌状態で計測したい場合は、滅菌プリスターパックから取り出して 70024 を使用する。

4.2 SourceCheck 4Pi (PTW社)

欧米で広く利用されており 2020 年より国内でも販売が開始された。現在はシングルシードで計測するホルダ (T33005.1.100) のみが用意されており、カートリッジのまま測定するにはホルダを自作する必要がある。

4.3 CRC-15BT (Capintec, A Mirion Medical Company社)

密封小線源治療用に開発されたウェル形電離箱であり、

国内でも JRIA で二次標準機として用いられてきた。2.5 気圧のアルゴンガスが密封されているため、感度が高い利点を有していたが、現在は製造が終了されている。ホルダはシングルシード用、ミックと BD 社製カートリッジ用の 3 種類があった。現在は CRC-55tR が類似品となるが、主に核医学分野で使用されている。開口径が広いので、セラ AgX100 及びセラストランド-SL をプリスターパックのまま計測できる。

4.4 IGC-8B (日本レイテック社)

核医学分野で放射性医薬品の線源強度の確認に広く使用されており、ドーズキャリブレーションとも呼ばれる。アルゴンガスが封入された密閉型のウェル形電離箱である。開口径が大きいので、セラ AgX100 及びセラストランド-SL をプリスターパックのまま計測できる。

5. 不確かさ評価

前立腺シード治療における不確かさは、5つの要素：線源強度、線量計算、不均質媒質、投与時の影響 (線源留置

時の解剖学的変化など)、画像誘導密封小線源治療における画像由来の不確かさに分けられる⁴²⁾。合成された不確かさは11% (包含係数 $k=1$) と推定され、その内の線源強度の不確かさは3%である。しかし、本報告は米国のトレーサビリティ体制下での評価であり、国内の現状を反映した不確かさではない。本項では、簡易法による線源強度計測も含む国内の現状を鑑みた線源強度の不確かさについて解説する。

計測の不確かさとは、計測値の「ばらつき」を示す指標で、結果の信頼性の評価につながる。真の値が含まれると考えられる区間を推定することであり、存在確率の高い幅を範囲で示している。線源強度の計測結果を正しく評価するためには、計測器の特性、線源強度計測の不確かさを理解する必要がある。

¹²⁵Iシードの製造工程では、品質管理の一環として線源強度の規格上限値と下限値を定めており、その値は出荷時の添付書類に記載される(図8と図9)。セラAgX100の出荷基準は、公称値から線源個別で $\pm 6\%$ 以内、平均値で $\pm 5\%$ 以内である。ブラキソースは線源強度で異なるが、公称値から線源個別で $\pm 5\%$ 以内となっている。なお、平均値での規定は設けていない。

線源強度を計測する計測器の校正も、不確かさを持っている。国内では、2010年から¹²⁵Iシードに対する校正サービスが開始された。当時のJRIAによるウェル形電離箱の校正の不確かさは、線源タイプの組み合わせによって異なるが、6.0% ($k=2$) であった。これは、米国のADCL (Accredited Dosimetry Calibration Dosimetry) に校正を依頼した時の不確かさ2.6% ($k=2$) と比較して大きい値である⁴³⁾。その後、2015年にAISTにおいて薄膜対向型自由空気電離箱が開発され、¹²⁵Iシードの標準線源の供給が開始されたことにより、校正の不確かさは3.0% ($k=2$) 以内に達成できると期待されている(校正の実績がないため想定値)¹¹⁾。

近年は、¹²⁵Iシードがカートリッジに装填された状態で計測するパッチアッセイが注目されている⁴⁴⁾。パッチアッセイには、ウェル形電離箱だけでなく、サーベイメータを用いる手法もある。2.4に記載したトレーサビリティの担保されたウェル形電離箱によるパッチアッセイでは、1個の線源に対する校正定数からパッチアッセイに変換する換算係数が必要になり、不確かさが増加する要因となる。また、2.5に記載したトレーサビリティの担保されない強度計測法(相対強度計測)は、表示値の相対比較となるため、計測の不確かさは機器の安定性や繰り返し再現性が、不確かさの主因となると考えられる。メーカーが提供する繰り返し再現性の仕様値は、CRC-15BTウェル形電離箱で $\pm 0.5\%$ 、451P型電離箱式サーベイメータ(FLUKE-Biomedical社製、米国)で $\pm 10\%$ である。451P型電離箱式サーベイメータについては、シードの測定ではより小さな再現性が期待される。

JASTROガイドラインでは、線源強度の許容値は、計測した¹²⁵Iシードの平均値と公称値の相違が3%以内、介入値は5%以上としているが、これはウェル形電離箱によるシングルシードアッセイを想定して書かれたものである⁹⁾。つまり、前提条件が異なる許容値と介入値を、そのまま他の計測法に適用することはできない。線源強度計測の結果は、製造業者が定める線源の出荷基準、使用した計測器の不確かさ、繰り返し精度、計測方法の再現性、計測した線源数などを総合的に評価して判断する必要がある。

6. まとめ

線源数の確認や線源強度計測について、実際に医療施設で実施されているいくつかの実務的な方法を紹介した。以下に要点をまとめる。

- ・線源引き渡しの際に、発注書と納品伝票等と照合して、齟齬が無いことを確認する。
- ・法令に基づく線源の適切な管理のために、患者挿入前に線源数を確認することが望ましい。
- ・線源数の確認には、カートリッジのX線撮影も有効な方法である。
- ・自施設において線源強度計測を実施することが望ましい。
- ・実務的線源強度計測法として、滅菌状態で実施可能なパッチアッセイや相対強度計測も、¹²⁵Iシードの品質保証に有効と考えられる。
- ・線源強度計測では、使用する計測器の繰り返し再現性など、統計的な評価を行うことが望ましい。
- ・海外では、自施設における線源強度計測の許容値が設定されているが、国内においては、一律の許容値を設定することは困難であると考えられる。
- ・統計的品質管理で計測値が基準値から大きく逸脱した場合は、第三者とともに計測手順を見直し、計測する線源数を増やすなどして再測定を検討する。
- ・それでも解決しない場合は、担当医師と品質管理担当者でその影響を協議した上で、シード治療の可否を決定する。
- ・線源供給業者に乖離が生じたことを報告する。

密封小線源治療においては、製造販売業者だけでなく医療施設がともに、¹²⁵Iシードの品質保証を行っていくことが重要である。本報告書がシード治療を実施する施設の品質保証の一助となることを期待する。

付録1. 海外における強度計測の現状

業者による強度計測のミス、デッドシードの混入、過剰被ばく事故などの事例が報告されたため、米国医学物理士会(以下、AAPM)は¹²⁵Iシードが用いられた当初からユーザによる計測の必要性に言及してきた⁴⁵⁾。AAPMの報告書番号56⁴⁶⁾ではユーザによる測定を推奨し、以降や他国のガイドライン等^{5), 47), 48)}でも踏襲された。その後、2008年にはタスクグループ(以下、TG)の報告書番号98⁴⁹⁾で、

線源強度の責任は病院に医学物理士にあると明記されるとともに、測定の時容値と推奨される線源数が提案された。測定用に余分に購入した場合は、全体の線源数の5%または5個の少ない方、非滅菌で購入した線源を患者に使用する前には、10%または10個の多い方を測定することを推奨している。線源強度の測定値と公称値との乖離は、5%とした。これらは以降のTG167⁵⁰⁾や他国でも踏襲されている。欧州放射線腫瘍学会 (ESTRO) からTG98の内容を踏襲したガイドラインが出された²⁶⁾。以上より、欧米の多くの国で、病院の医学物理士が¹²⁵Iシードの線源強度を保証することを求めており、そのためには事前の線源強度計測が推奨されている。

米国では、連邦政府によって医学物理士による密封小線源の線源強度計測が、患者または保険会社に請求できる規定となっている⁵¹⁾。その他の国では、米国と同様に請求できる場合や日本と同様に治療費に含まれるなどさまざまである。ドイツでは条例により、製造販売業者が線源強度を担保すると規定されているが、病院での測定も推奨されている⁵²⁾。強度計測のために購入した線源の費用は、病院が負担しなければならない国内とは、状況が大きく異なる。

付録2. アンケート結果⁵³⁾

国内の¹²⁵Iシードの強度計測の現状と問題点の把握を目的に、¹²⁵I計測WGが中心となって2020年12月から2021年4月まで、Googleフォームを通じてアンケートを行った。2021年現在で前立腺シード治療を行っていると考えられる95施設のうち67施設から回答を得た(回収率

70.5%)。ここでは結果の一部を抜粋する。線源強度計測は11施設(線源数の確認も行う施設を含む)、線源数の確認が27施設、残る29施設が双方とも実施していなかった。なお、ここでの線源強度計測は相対強度計測を含む。また、1施設のみシングルシードアッセイ法の計測を行っていた。線源強度計測を行っている施設は全体の16.4%となり、2008年に実施したアンケート⁵⁴⁾の5%(20施設中1施設)よりも増加していた。表5に使用している線源モデルと装填方法ごとの計測方法を示す。シングルシードアッセイ法で計測すると回答した唯一の施設では、患者に挿入されなかった余剰線源を計測しており、治療前に線源強度を確認する体制になっていない。シングルシードアッセイ法とバッチアッセイ法ともに、校正事業者が提供するウェル形電離箱の校正定数を用いることで、国家標準にトレーサブルな基準空気カーマ率または空気カーマ強度を測定できる。しかし、今回のアンケート結果から、トレーサビリティの担保された方法を採用していると回答した施設は無く、ほぼ全ての施設が前回の値と比較するなどの相対的な線源強度を評価していると考えられた。

線源強度を計測していない施設が回答したその理由を表6に示す。滅菌ができない、製造業者による線源の品質保証が確立されている、人員不足との回答が多かった。表7に線源強度計測を実施するために必要なことを、要因ごとに分類して回答数とともに示す。計測器が無いことや、計測の方法がわからない、人員不足など、計測するための環境整備が問題となっていた。続いて、費用が保険請求できない、計測に使用した線源の法的規制がある、国内

表5 使用している線源型式と線源タイプごとの計測方法

線源型式	線源タイプ	使用施設数	シングルシード アッセイ法	バッチアッセイ法	その他 サーバイメータなど
STM1251	ミックカートリッジ	48	1	4	1
	クイックリンクカートリッジ	48	0	2	0
	レディリンク	1	0	0	0
TheraAgX100*	セラstrand-SL	34	1	1	0
	セラAgX100	30	1	1	0

*セラAgX100とセラstrand-SLは、ミックアプリケーションに装填されて納入される

表6 線源強度計測ができない要因

要因	回答数
滅菌や再滅菌ができない	59
製造業者が報告する線源強度を信用	50
人員不足	41
線源納入からシード治療までが短期間	32
被ばくを避けたい	31
測定機器がない	26
測定用の線源を購入できない	25
線源の紛失が心配	25
測定方法がわからない	15
線源強度を計測する必要は無いと考える	5

表7 線源強度計測を実施するために必要と考えられる意見

項目	回答数
測定機器の充足	55
線源強度計測法の習熟	50
線源強度計測を保険点数に反映するなど病院収益に反映	50
人員の増加	46
ガイドライン等で強度計測を必須とする	41
測定に使用した線源を、法令*などの規制から除外	34
その他	6
いずれにせよ、計測できないと考える	5

*放射性同意元素等の規制に関する法律を指すと考えられる

のガイドラインでは治療前の線源強度計測が規定されていない, などの回答が多かった。

参考文献

- 1) Yorozu A: Current status of prostate brachytherapy in Japan. *Jpn. J. Radiol.* 38: 934–941, 2020
- 2) Koga H, Naito S, Ishiyama H, et al.: Patient-reported health-related quality of life up to three years after the treatment with permanent brachytherapy: Outcome of the large-scale, prospective longitudinal study in Japanese-Prostate Cancer Outcome Study by Permanent I-125 Seed Implantation (J-POPS). *Brachyther.* 18: 806–813, 2019
- 3) Ito K, Saito S, Yorozu A, et al.: Nationwide Japanese Prostate Cancer Outcome Study of Permanent Iodine-125 Seed Implantation (J-POPS): First analysis on survival. *Int. J. Clin. Oncol.* 23: 1148–1159, 2018
- 4) 日本泌尿器科学会: 前立腺癌診療ガイドライン2016. メディカルレビュー社, 2016
- 5) Yu Y, Anderson LL, Li Z, et al.: Permanent prostate seed implant brachytherapy: Report of the American Association of Physicists in Medicine Task Group No. 64. *Med. Phys.* 26: 2054–2076, 1999
- 6) Otani Y, Yamada T, Kato S, et al.: Source strength assay of iodine-125 seeds sealed within sterile packaging. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* 14(2): 4082, 2013
- 7) Sumida I, Koizumi M, Takahashi Y, et al.: Verification of air-kerma strength of 125I seed for permanent prostate implants in Japan. *Int. J. Clin. Oncol.* 14: 525–528, 2009
- 8) Takahashi Y, Ito A, Sumida I, et al.: Dosimetric consideration of individual 125I source strength measurement and a large-scale comparison of that measured with a nominal value in permanent prostate implant brachytherapy. *Radiat. Med.* 24: 675–679, 2006
- 9) ¹²⁵I永久挿入治療物理QAガイドライン検討専門小委員会: ¹²⁵I永久挿入治療の物理的品質保証に関するガイドライン, 2010
- 10) HDR組織内照射等の標準化の研究班: I-125永久挿入治療物理QAマニュアル(2011). 厚生労働省がん研究開発費 指定研究21分指8②: HDR組織内照射等の標準化の研究 (小口正彦主任研究者), 2011
- 11) 日本放射線腫瘍学会 小線源治療部会編: 小線源治療部会ガイドラインに基づく密封小線源治療診療・物理QAマニュアル (第2版). 金原出版, 東京, 2022
- 12) 日本放射線腫瘍学会: 放射線治療インシデント報告 ヨウ素125線源におけるインシデント (不良線源混入) 事例 (S01-2018-003). <https://www.jastro.or.jp/member/news/s01-2018-003.pdf> (Accessed 2022/8/5)
- 13) 日本放射線腫瘍学会: 放射線治療インシデント報告 ヨウ素125前立腺密封小線源治療に関わるインシデント事例の報告 (S02-2017-002). <https://www.jastro.or.jp/member/news/170817.pdf> (JASTRO会員ページ) (Accessed 2022/8/5)
- 14) 高井公雄: セラストンド-SLにおける線源数が不足したカートリッジ提供の報告, 東京コンファレンスセンター・品川, 2020
- 15) 南 克哉: 国内の線源供給におけるQA体制について. *日放射線技術会誌* 65: 100–103, 2009
- 16) Furutani S, Ikushima H, Ozaki K, et al.: Quality assurance of I-125 seed permanent implant therapy using a self-color developing reflection-type dosimetry sheet film. *Radiat. Med.* 23: 474–477, 2005
- 17) Furutani S, Saze T, Ikushima H, et al.: Quality assurance of I-125 seeds for prostate brachytherapy using an imaging plate. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 66: 603–609, 2006
- 18) Murny JS, Wilkinson DA: A method for confirming a third-party assay of I-125 seeds used for prostate implants. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* 18: 53–58, 2017
- 19) Sakama M, Ikushima H, Saze T, et al.: Development of automated measurement system for radioactive intensities of sealed small radiation sources (Iodine-125 seed source) for brachytherapy, 5th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Sep. 2013
- 20) Tanaka K, Kajimoto T, Hayashi T, et al.: An in vitro verification of strength estimation for moving an 125I source during implantation in brachytherapy. *J. Radiat. Res.* 59: 484–489, 2018
- 21) 阪間 稔, 安野 卓, 山田隆治, 他: 前立腺がん治療用ヨウ素(¹²⁵I)シード放射線強度品質管理測定システムの開発と製品化. *Isotope News* 736: 18–21, 2015
- 22) 日本医学物理学会編: 密封小線源治療における吸収線量の標準計測法 (小線源標準計測法18). 通商産業研究社, 東京, 2018
- 23) 原子力規制委員会: 原子炉等規制法または放射性同位元素等規制法に基づく報告. https://www.nra.go.jp/activity/bousai/trouble/houkoku_new/220000006.html (Accessed 2023/1/31)
- 24) Nath R, Anderson LL, Luxton G, et al.: Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 43. *Med. Phys.* 22: 209–234, 1995
- 25) Baltas D, Sakelliou L, Zamboglou N: The Physics of Modern Brachytherapy for Oncology. Taylor & Francis, 2007
- 26) Perez-Calatayud J, Ballester F, Carlsson Tedgren A, et al.: GEC-ESTRO ACROP recommendations on calibration and traceability of LE-LDR photon-emitting brachytherapy sources at the hospital level. *Radiother. Oncol.* 135: 120–129, 2019
- 27) Rivard MJ, Coursey BM, DeWerd LA, et al.: Update of AAPM Task Group No. 43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations. *Med. Phys.* 31(3): 633, 2004
- 28) Unno Y, Kurosawa T, Yunoki A, et al.: High sensitive standard measurement to determine strength of an I-125 brachytherapy source, 2011 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 377–381, 2011
- 29) Unno Y, Yunoki A, Kurosawa T, et al.: Measurement of anisotropic angular distributions of photon energy spectra for I-125 brachytherapy sources. *Appl. Radiat. Isot.* 70: 2240–2242, 2012
- 30) Seltzer SM, Lamperti PJ, Loevinger R, et al.: New National Air-Kerma-Strength Standards for ¹²⁵I and ¹⁰³Pd brachytherapy seeds. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 10: 337–358, 2003
- 31) 熊崎 祐, 山田 崇: 密封小線源治療における線量標準の導入. *日放射線技術学会誌* 68: 633–636, 2012
- 32) Standard Imaging I. HDR 1000 PLUS WELLCHAMBER REF 90008. https://www.standardimaging.com/uploads/manuals/HDR1000_MNL_80026-20.pdf (Accessed 2016/12/16)
- 33) Bohm TD, Griffin SL, DeLuca PM, Jr., et al.: The effect of ambient pressure on well chamber response: Monte Carlo calculated results for the HDR 1000 plus. *Med. Phys.* 32: 1103–1114, 2005
- 34) Griffin SL, DeWerd LA, Micka JA, et al.: The effect of ambient pressure on well chamber response: Experimental

- results with empirical correction factors. *Med. Phys.* 32: 700–709, 2005
- 35) 小島 徹: I-125線源計測のガイダンス, 密封小線源治療安全取扱講習会 (ヨウ素125シード線源による前立腺癌永久挿入密封小線源治療および高線量率ラース医療安全取扱講習会) WEB講習会資料, 2023
 - 36) 山下 修: 前立腺小線源治療の事故と線源計測, 密封小線源治療安全取扱講習会 (ヨウ素125シード線源による前立腺癌永久挿入密封小線源治療および高線量率ラース医療安全取扱講習会) WEB講習会資料, 2022
 - 37) 医療機器添付文書. セラAgX100 2022年7月改訂 (第4版). https://www.info.pmda.go.jp/downfiles/md/PDF/530359/530359_22800BZX00104000_A_01_04.pdf (Accessed 2023/2/20)
 - 38) 医療機器添付文書. セラストランド-SL 2022年7月改訂 (第4版). https://www.info.pmda.go.jp/downfiles/md/PDF/530359/530359_22800BZX00103000_A_01_04.pdf (Accessed 2023/2/20)
 - 39) ISO 9978:1992 Radiation protection—Sealed radioactive sources—Leakage test methods, 1992
 - 40) 医療機器添付文書. パード ブラキソース 滅菌タイプ2022年5月改訂 (第5版). https://www.info.pmda.go.jp/downfiles/md/PDF/780045/780045_22000BZX00697000_A_03_07.pdf (Accessed 2023/2/20)
 - 41) 医療機器添付文書. パード ブラキソース システム2022年5月改訂 (第4版). https://www.info.pmda.go.jp/downfiles/md/PDF/780045/780045_22400BZX00158000_A_01_05.pdf (Accessed 2023/2/20)
 - 42) Kirisits C, Rivard MJ, Baltas D, et al.: Review of clinical brachytherapy uncertainties: Analysis guidelines of GEC-ESTRO and the AAPM. *Radiother. Oncol.* 110: 199–212, 2014
 - 43) DeWerd LA, Ibbott GS, Meigooni AS, et al.: A dosimetric uncertainty analysis for photon-emitting brachytherapy sources: Report of AAPM Task Group No. 138 and GEC-ESTRO. *Med. Phys.* 38: 782, 2011
 - 44) 小島 徹, 川村慎二, 大谷侑輝, 他: I-125シードの線源強度計測アンケートの報告. 日本放射線腫瘍学会第34回学術大会予稿集, 2021
 - 45) Kutcher GJ, Coia L, Gillin M, et al.: Comprehensive QA for radiation oncology: Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 40. *Med. Phys.* 21: 581–618, 1994
 - 46) Nath R, Anderson LL, Meli JA, et al.: Code of practice for brachytherapy physics: Report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 56. American Association of Physicists in Medicine. *Med. Phys.* 24: 1557–1598, 1997
 - 47) Venselaar J, Bidmead M, Pérez-Calatayud J, et al.: A practical guide to quality control of brachytherapy equipment (ESTRO Booklet 8). ESTRO, 2004
 - 48) Nag S, Dobelbower R, Glasgow G, et al.: Inter-society standards for the performance of brachytherapy: A joint report from ABS, ACMP and ACRO. *Crit. Rev. Oncol. Hematol.* 48: 1–17, 2003
 - 49) Butler WM, Bice WS, Jr., DeWerd LA, et al.: Third-party brachytherapy source calibrations and physicist responsibilities: Report of the AAPM Low Energy Brachytherapy Source Calibration Working Group. *Med. Phys.* 35: 3860–3865, 2008
 - 50) Nath R, Rivard MJ, DeWerd LA, et al.: Guidelines by the AAPM and GEC-ESTRO on the use of innovative brachytherapy devices and applications: Report of Task Group 167. *Med. Phys.* 43: 3178–3205, 2016
 - 51) Commission USNR: NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations §35.432 Calibration measurements of brachytherapy sources. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part035/part035-0432.html> (Accessed 2023/3/25)
 - 52) Zurück zur Teilliste Bundesministerium für Umwelt NuR. Durchführung der Strahlenschutzverordnung; hier: Strahlenschutz in der Medizin—Richtlinie zur Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung—StrlSchV). https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_17102011_RSII4114321.htm (Accessed 2023/3/25)
 - 53) Kojima T, Kawamura S, Otani Y, et al.: A questionnaire-based survey on the dosimetric assay of I-125 seed sources at medical facilities in Japan. (tentative title) submitting.
 - 54) 土器屋卓志: がんの小線源放射線治療の評価と品質管理に関する研究報告書. 厚生労働省がん研究開発費 指定研究17分指10: がんの小線源放射線治療の評価と品質管理に関する研究 (土器屋卓志主任研究者), 2008

表彰報告

2021年度RPT誌土井賞（優秀論文賞）・MCA・
優秀査読者賞表彰の報告

英語論文誌担当理事

納富昭弘

2021年度のRPT誌土井賞（優秀論文賞）・MCA(Most Citation Award)・優秀査読者賞が決定しました。JRC2022の会期中に表彰式、土井賞受賞講演会が行われました。今回の土井賞は2021年に発行されたVol. 13-4, Vol. 14-1, Vol. 14-2, Vol. 14-3に掲載された対象論文42編の中から、診断物理分野、核医学・MRI分野、放射線治療・計測・防護分野の3つのカテゴリにおける最優秀論文が選考され表彰されました。また、2019年に掲載された論文のうち、最も引用された上位3編の論文にMCAが授与されました。あわせて、優秀査読者4名も表彰されました。受賞された各分野の土井賞論文とMCA論文、優秀査読者は以下のとおりです。なお、土井賞受賞論文については、論文内容の紹介記事を掲載いたします。

1. 土井賞（優秀論文賞）

【診断物理分野：Diagnostic Imaging】

論文名：Effects of sample size and data augmentation on U-Net-based automatic segmentation of various organs.

著者：Takafumi Nemoto, Natsumi Futakami, Etsuo Kunieda, Masamichi Yagi, Atsuya Takeda, Takeshi Akiba, Eride Mutu, Naoyuki Shigematsu

巻号：Vol. 14(3): 318–327 (2021)

【核医学・MRI分野：Nuclear Medicine and MRI】

論文名：Iterative framework for image registration and partial volume correction in brain positron emission tomography.

著者：Keisuke Matsubara, Masanobu Ibaraki, Miho Shidahara, Toshiyuki Kinoshita on behalf of for the Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative

巻号：Vol. 13(4): 348–357 (2020)

【放射線治療・計測・防護分野：Radiation Therapy Physics】

論文名：Investigation of clinical target volume segmentation for whole breast irradiation using three-dimensional convolutional neural networks with gradient-weighted class activation mapping.

著者：Megumi Oya, Satoru Sugimoto, Keisuke Sasai, Kazuhito Yokoyama

巻号：Vol. 14(3): 238–247 (2021)

2. MCA (Most Citation Award)

論文名：Overview of image-to-image translation by use of deep neural networks: denoising, super-resolution, modality conversion, and reconstruction in medical imaging.

著者：Shizuo Kaji, Satoshi Kida

巻号：Vol. 12(3): 235–248 (2019)

論文名：Influence of the size of nano- and microparticles and photon energy on mass attenuation coefficients of bismuth-silicon shields in diagnostic radiology.

著者：Reza Malekzadeh, Parinaz Mehnati, Mohammad Yousefi Sooteh, Asghar Mesbahi

巻号：Vol. 12 (3): 325–334 (2019)

論文名：Automated segmentation of 2D low-dose CT images of the psoas-major muscle using deep convolutional neural networks.

著者：Fumio Hashimoto, Akihiro Kakimoto, Nozomi Ota, Shigeru Ito, Sadahiko Nishizawa

巻号：Vol. 12 (2): 210–215 (2019)

3. 優秀査読者賞

Hideki Takegawa PhD, Kansai Medical University Hospital

Yasuo Takatsu PhD, Tokushima Bunri University

Takashi Ueguchi PhD, National Institute of Information and Communications Technology

Morihiro Shimizu PhD, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology



写真1 兼松編集長と土井賞受賞者の方々



写真2 兼松編集長とMCA受賞者の方々



写真3 兼松編集長と優秀査読者賞受賞者の方々

論文紹介

〈連載：RPT誌特集〉

RPT誌土井賞受賞論文

Title: Effects of sample size and data augmentation on U-Net-based automatic segmentation of various organs

Authors: Takafumi NEMOTO, Natsumi FUTAKAMI, Etsuo KUNIEDA, Masamichi YAGI, Atsuya TAKEDA, Takeshi AKIBA, Eride MUTU, Naoyuki SHIGEMATSU
Publish: 14(3): 318–327, 2021

タイトル：U-Netを用いた各種臓器の自動セグメンテーションにおけるサンプルサイズとデータオーグメンテーションの効果

著者：根本貴文，二上菜津実，国枝悦夫，八木政道，武田篤也，秋庭健志，エリデムツ，茂松直之

深層学習はコンツェリングにおいて、高い精度で自動セグメンテーションつまり自動輪郭描写ができることを示してきた。一方で、医用画像は一般画像と比して、データ取得やラベル付け、管理に人的、時間的コストを要する。そのような医用画像の学習ではどのくらいの症例数が必要なのかははっきりしていない。本論文¹⁾は、U-Netと呼ばれる深層学習モデルでcomputed tomography(CT)画像を学習したとき、学習する症例数の多寡によってセグメンテーションの精度がどのように変化するかを調べた。

使用したデータセットは骨盤領域と胸部領域の2領域の単純CT画像である。骨盤領域では前立腺癌の556症例を用い、前立腺、膀胱、直腸のセグメンテーションを評価した。胸部領域では非小細胞肺癌の232症例を用い、心臓と肺のセグメンテーションを評価した。556症例の骨盤領域については、まず56症例を精度評価のためのテストセットとして温存した。残りの500症例は学習用に使い、10, 20, 30…500と学習用の症例数を段階的に増加させ、各々の学習症例数においてテストセットに対する精度がどのように変化するかを調べた。232症例の胸部領域についても同様に23症例をテストセットとし、残りの200症例の中から10, 20, 30…200と学習症例数を増加させた。学習は5分割交差検証を施行した。交差検証は機械学習モデルの汎化性能を高める手法である。トレーニングセットとバリデーションセットを4:1に分割して、学習を5回繰り返した。5つのモデルの結果を多数決させ、テストセットに対する最終結果とした。U-Netはセグメンテーションで最もよく知られた深層学習モデルであり、本研究では2次元U-Netを構築した。データオーグメンテーションというデータ増幅法を用いて、左右反対の画像を作成し画像を2倍に増幅した。評価にはDice係数(Dice similarity coefficient, DSC)を用いた。DSCは正解画像とU-Netが生成した画像の

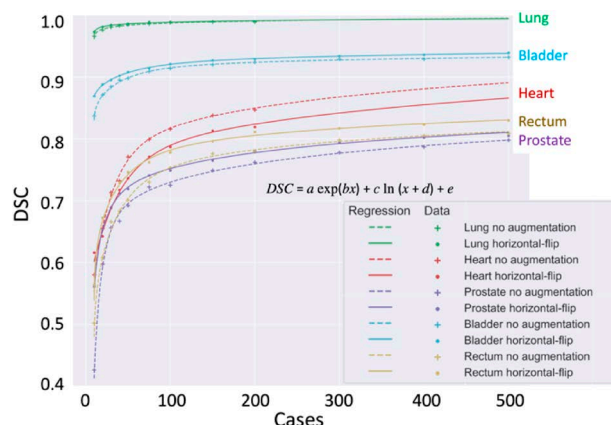


図1 症例数とDSCの相関。横軸に症例数、縦軸にDSCをとり、散布図と回帰曲線を描画した(論文¹⁾のFig. 4を一部改変)

重なりを計算し、類似度を示すものである。値が高いほど正確なセグメンテーションであることを示す。

症例数を横軸、DSCを縦軸にとり、散布図をプロットし、回帰曲線を描いた(図1)。緑色が肺、水色が膀胱、赤色が心臓、黄色が直腸、紫色が前立腺である。点線はオーグメンテーションを使用していないもの、実線は左右反転オーグメンテーションにより擬似的に2倍のデータ量にして学習したものである。学習した症例数が多いほどDSCは上昇した。DSCは100症例程度までは急激に上昇し、200症例以上で安定し、さらに件数を増やしてもあまり変化しなかった。心臓以外の全ての臓器において、左右反転オーグメンテーションの追加によってDSCは上昇し、より少ない症例数でDSCは安定した。肺の全症例と前立腺、膀胱、直腸の100症例以上において、左右反転オーグメンテーションの追加によって症例数を2倍にするのとはほぼ同等の効果を認めた。例えば、直腸(黄色)ではオーグメンテーションなしの300症例とオーグメンテーションありの150症例のDSCが同程度であった。

本研究の知見は、大規模なデータ取得が困難な希少癌のデータ取得の際に有用と考えられる。限界として、本研究の結果は深層学習モデルの種類やデータオーグメンテーションなどの前処理、対象画像の複雑さなどに依存する可能性があるということが挙げられる。

結論として、症例数の増加に伴いDSCは増加傾向を示したが、比較的少量の学習データでほとんどの臓器のセグメンテーションが可能であることが示唆された。左右反転オーグメンテーションは肺、前立腺、膀胱、直腸で有用であった。

参考文献

- 1) Nemoto T, Futakami N, Kunieda, E, et al.: Effects of sample size and data augmentation on U-Net-based automatic segmentation of various organs. Radiol. Phys. Technol. 14: 318–327, 2021

執筆著者：根本貴文(慶應義塾大学医学部放射線科学教室)

論文紹介

〈連載：RPT誌特集〉

RPT誌土井賞受賞論文

Title: Iterative framework for image registration and partial volume correction in brain positron emission tomography

Authors: Keisuke MATSUBARA, Masanobu IBARAKI, Miho SHIDAHARA, Toshibumi KINOSHITA, for the Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative

Publish: 13(4): 348–357, 2020

タイトル：脳PETにおける画像位置合わせ及び部分容積効果補正を同時に行うフレームワークの提案

著者：松原佳亮, 茨木正信, 志田原美保, 木下俊文

PET (positron emission tomography) の空間分解能不足による画像のボケによって大脳皮質におけるPET画像の輝度値（放射能濃度）は周辺組織に流出してしまい、正しい定量値が得られなくなる。この現象を“部分容積効果”と呼ぶ。特にアルツハイマー病 (AD; Alzheimer's disease) 患者の脳は萎縮しており、部分容積効果が強くなるため、脳PET画像の定量性を下げる原因となっている。この部分容積効果を補正する方法が数多く提案されている。脳PET検査においてはPET装置固有の点拡がり関数 (PSF; point spread function) とMRI検査で取得した解剖画像を用いて行うMR-PVC (MR-imaging-guided partial volume correction) がよく用いられている。一方でMR-PVCの欠点としてMR-PET間の位置合わせ誤差の影響を強く受けやすいという問題がある。そこで著者らはMR-PVC法における位置合わせ誤差の問題を解消するために、PVCとMR-PET間画像位置合わせを同時に行うフレームワーク、PoR (PVC-optimized registration) を提案した¹⁾。

PoRの概略図を図1に示す。PoRでは最初に従来どおりMR-PET間の位置合わせとGTM法によるPVCを実行し、VOI-levelで補正された画像 (synthetic PET画像) を取得する。次にsynthetic PET画像をPSFでスムージングし、元のPET画像と同じ分解能を持つsynthetic PET画像を生成する。その後、このスムージングしたsynthetic PET画像と元のPET画像との位置合わせを行う。以後、同様の処理を位置合わせ処理による移動量が収束するまで繰り返す。最後に得られた画像にRBV (region-based voxel-wise) 法を適用し、voxel-levelの補正画像を取得する。スムージングしたsynthetic PET画像はMR画像から得た解剖情報とPET薬剤分布の情報の両方を持っているため、通常のMR画像との位置合わせと比べて、元のPET画像との位置合わせがうまくいくというのがPoRの仕組みである。本研究ではADNI (Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative) データベースから92名 (健康者16名、軽度認知障害患者58名、AD患者18名) の¹¹C-PiB PET画像

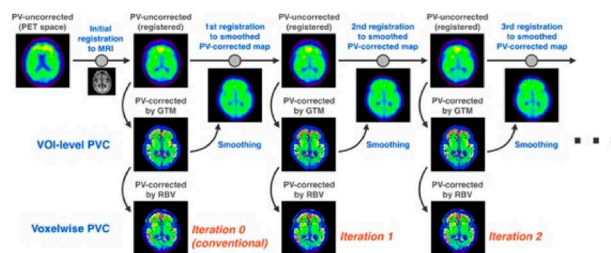


図1 PoRの概略図 (元論文¹⁾のFig. 1と同一)

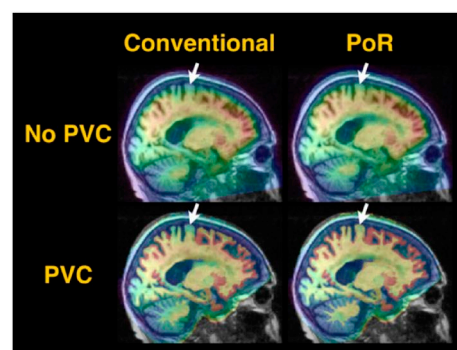


図2 2.74 mmの位置の差がみられた例の画像 (元論文¹⁾のFig. 4と同一)

及びMR T1強調画像を取得し、PoRの適用を試みた。また対照として従来どおりMR-PET位置合わせ及びRBV法によるPVCも行い、各領域のSUV (standardized uptake value) の対小脳比 (SUVR) 及びその領域内変動 (CoV; coefficient of variation) を比較した。

従来法とPoRとでの位置合わせ後の位置の差は最大で2.74 mm及び3.02度であった。体軸方向に2.74 mmの差がみられた例の画像を図2に示す。体軸方向のMR-PET間のズレにより本来感覚運動野がある箇所のSUV値が低くなっており (図2左上)、そのままPVCを行うとその箇所の補正後SUV値も不自然に低くなった (図2左下)。一方PoRを適用した場合にはMR-PET間の目立ったズレはみられず (図2右上)、PVC後のSUV値も自然な値になっている (図2右下)。実際にこの例では最大で62.3%ものSUVRの差がみられた。またPoRを適用することにより、従来法と比べて有意な領域内変動の低下が脳全体でみられた。これらの結果はPoRによってMR-PET間の位置ずれが解消され、正確なSUVR値が得られていることを示唆している。

本研究で提案したPoRによって、MR-PET間の位置ずれが解消され、PVCした画像の定量性が改善されることが示された。PoRは本研究で適用したアミロイドPETだけでなく、ドーパミントランスポーターイメージングなど、MR T1強調画像とPET/SPECT画像の分布とで乖離があり位置合わせが困難な場合にも適用可能であり、脳神経経医学イメージング分野における幅広い適用が期待できる。

参考文献

- 1) Matsubara K, Ibaraki M, Shidahara M, et al.: Iterative framework for image registration and partial volume correction in brain positron emission tomography. Radiol. Phys. Technol. 13: 348–357, 2020

執筆者：松原佳亮 (秋田県立大学)

論文紹介

〈連載：RPT誌特集〉

RPT誌土井賞受賞論文

Title: Investigation of clinical target volume segmentation for whole breast irradiation using three-dimensional convolutional neural networks with gradient-weighted class activation mapping

Authors: Megumi OYA, Satoru SUGIMOTO, Keisuke SASAI, Kazuhito YOKOYAMA

Publish: 14 (3): 238–247, 2021

タイトル：全乳房放射線照射における，3次元量込みみニューラルネットワークを用いた臨床標的体積の自動セグメンテーションの，勾配加重クラス活性化マッピングを用いた検証

著者：大矢めぐみ，杉本 聡，笹井啓資，横山和仁

本論文¹⁾では乳房温存照射のターゲット（臨床標的体積，Clinical Target Volume, CTV）の自動輪郭描出に，深層学習モデルである3D-UNetを適用し，その性能の評価を行っている。さらに，深層学習モデルが予測を行う際に着目している領域を可視化できるGradient-Weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM)²⁾を用い，3D-UNetが輪郭描出の際に着目している領域の可視化を試みている。深層学習モデルが予測を行う際に着目している領域の可視化は，モデルの性質，適用限界など臨床応用に際して有用な情報を提供し，自動輪郭描出の品質管理に応用できると期待される。

乳房温存術後の放射線治療は局所再発率を下げる事がわかっており，標準治療の一環として行われている。乳房温存術後照射のターゲット（CTV）の輪郭描出は通常，手動で行われるが，自動化することにより，医療従事者への負担を軽減できると期待されている。著者らは近年急速に発展してきている深層学習モデルの一つである，3D-UNetを用いたCTVの自動輪郭抽出モデルを192名の患者データを用いて作成し，別の60名の患者に適用することにより，その性能を評価している。その結果，3次元の画像を入力とする3D-UNetを用いることにより，200名弱という比較的小さい学習データにもかかわらず，ダイス係数が0.85以上と既存の研究³⁾と同等の性能を得ている。

著者らはさらに，深層学習モデルが予測を行う際にどの

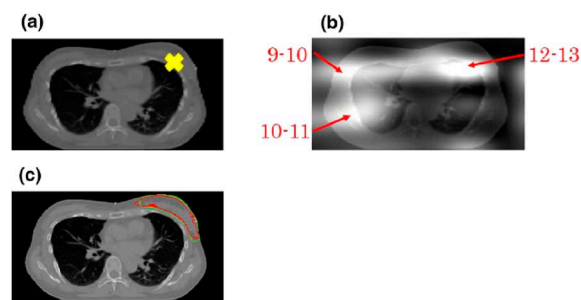


図1 左乳房温存術後照射のCTVの3D-UNetを用いた自動輪郭描出に対するGradient-weighted class activation mapping (Grad-CAM) heatmap. (a) もとの画像，黄色で示した点は予測を行う点，(b) Grad-CAM heatmap，赤で記した数字はハイライトされている領域でのheatmap値の範囲，(c) 3D-UNetを用いた自動輪郭描出結果（赤：予測，緑：真値）。（紹介論文¹⁾の図5から転載）

部分を着目するかを可視化できるGrad-CAMを，CTV自動輪郭描出3D-UNetに適用し，図1のように3D-UNetが輪郭描出を行う際に着目している点の可視化を試みている。深層学習モデルのような機械学習モデルを臨床に応用する際には，どのような仕組みでモデルが予測を行っているかを説明できることが望ましいと考えられる。図1は3D-UNetが予測を行う際に，予測点の近傍だけではなく，広い範囲にわたって，体内の他の領域も参照している可能性があることを示している。3D-UNetがどのような情報に着目して予測を行っているかを把握できることにより，モデルの性質，適用限界など，モデルの説明可能性につながる情報が得られると期待できる。これらの情報は自動輪郭描出の品質管理，ひいては放射線治療の品質の向上に貢献すると考えられる。

参考文献

- 1) Oya M, Sugimoto S, Sasai K, et al.: Investigation of clinical target volume segmentation for whole breast irradiation using three-dimensional convolutional neural networks with gradient-weighted class activation mapping. Radiol. Phys. Technol. 14: 238–247, 2021
- 2) Selvaraju R, Cogswell M, Das A, et al.: Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis. 2017-Octob: 618–626, 2017
- 3) Men K, Zhang T, Chen X, et al.: Fully automatic and robust segmentation of the clinical target volume for radiotherapy of breast cancer using big data and deep learning. Phys. Med. 50: 13–19, 2018

執筆：杉本 聡（順天堂大学），
大矢めぐみ（理化学研究所・千葉大学）

施設紹介

広島大学大学院医系科学研究科医学物理士養成コースの紹介

齋藤明登*

広島大学病院放射線治療科

Introduction of Medical Physics Course at Hiroshima University

Akito SAITO*

Department of Radiation Oncology, Hiroshima University Hospital

1. 施設概要

広島大学では2012年度に寄附講座が設置され、医学物理研究グループの活動が開始されました。現在は広島大学病院放射線治療科 (<https://housya.hiroshima-u.ac.jp>) と広島駅北口の広島がん高精度放射線治療センター (<https://hiprac.jp>) に所属する医学物理士5名で研究教育活動を行っています。2022年度の在籍大学院生は、修士課程が7名、博士課程が5名です。当初は近隣の放射線治療施設に勤務する社会人大学院生が大半を占めていましたが、近年は学部卒業後すぐに入学する大学院生が増えており、研究グループの活動が加速度的に伸びている状況です。

広島大学病院放射線治療センターでは、外部照射用にCTシミュレータ1台、リニアック2台を保有し、2021年の実績で583例の治療を実施しています。このうち、VMATが208例、SBRTが39例で、これらの高精度放射線治療にも積極的に取り組んでいます。また高線量率小線源治療装置1台と小線源治療室内CTによる画像誘導高線量率小線源治療を行っており、2021年の実績で35例の治療を実施しています。このほかに、口腔がんの組織内照射が14例、甲状腺がん内用療法が87例（いずれも2021年実績）で、他診療科との連携により幅広い放射線治療を提供しています。診療実績については<https://housya.hiroshima-u.ac.jp/information/results/> をご覧ください。

2. 教育活動

広島大学の大学院修士課程は2013年度より医学物理士認定機構の認定を受け、大学院生を受け入れています。2012年の発足以来順調に輩出実績を伸ばしており、2022年度終了時点で修士23名、博士11名（うち4名は早期修了）を輩出しています。

学外での教育活動にも積極的に参加しており、国内ではPHITS講習会やPython講習会をはじめとする各種講習会を開催し、また国外向けでは放射線被曝者医療国際協力推進協議会 (<http://www.hicare.jp>) とIAEAの共催による放射線治療のトレーニングコース（2016, 2018, 2022年度）で講師を担当するなど、放射線治療の普及に寄与する教育活動に積極的に参加しています。

3. 研究活動

広島大学の医学物理研究グループでは様々な研究テーマに取り組んでいます。設立以来、放射線治療における医学物理研究を中心とした継続的な活動が実を結び、放射線治療の臨床における評価研究から人工知能を用いた研究まで幅広い研究活動を展開しています。これまでの研究テーマを以下にいくつか挙げますが、詳細については広島大学の医学物理研究グループのホームページ https://housya.hiroshima-u.ac.jp/medical_physics/ をご参照いただきたいと思います。

3.1 強度変調放射線治療における線量精度に関する研究

IMRTでは複雑な形状の小照射野のビームを様々な方向から照射することにより、3次元的に複雑な形状で均一な線量分布を実現しています。3D-CRTでは全脳全脊髄照射や乳房多門照射における照射野の繋ぎ目の線量不確定性に関する理解が広く浸透している一方で、IMRTでは標的体積の中に積算される線量不確定性の定量的な理解が進んでいません。そこで我々のグループでは、線量不確定性積算アルゴリズムを活用し、ガンマパス率の予測アルゴリズムを開発しました¹⁾。この手法によるガンマパス率の予測精度は近年盛んに行われている人工知能による予測精度に及ばないものの、この研究により線量不確定性のガンマ解析における役割の理解が深まりました。

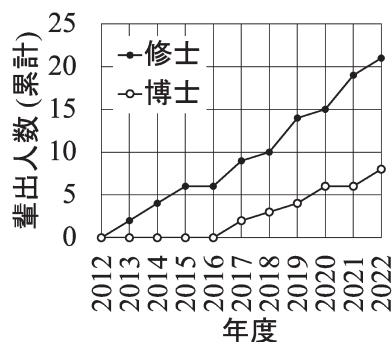


図1 大学院修士・博士輩出実績

* 連絡著者(corresponding author) 広島大学病院放射線治療科 [〒734-8551 広島市南区霞 1-2-3]

Department of Radiation Oncology, Hiroshima University Hospital, 1-2-3 Kasumi, Minami-ku, Hiroshima 734-8551, Japan

E-mail: akito@hiroshima-u.ac.jp

ガンマパス率予測については我々のグループでも人工知能を用いた予測システムの開発を推進しており、我々の最新の研究ではガンマ分布を画像生成技術GANを用いて生成する全く新しい手法を開発し、従来のガンマパス率の値だけの予測ではなくガンマ分布も同時に予測するシステムを開発しました²⁾。

これらの線量不確定性やガンマパス率に関連する研究は、我々が臨床で用いているIMRTの最新技術をただ用いるのではなく、IMRTの特徴を様々な方向から深く理解したうえで確実に安全な品質管理を実施するのに役立つと考えています。

3.2 近赤外線カメラを用いた研究

我々のグループでは大阪大学との共同研究により、近赤外線カメラを用いた呼吸モニタシステムの開発を行っています。従来のシステムは天井等に常設されたカメラによる計測をするのが主流ですが、我々は着脱可能で瞬時に較正できる呼吸モニタシステムの開発を行っています。Microsoft Kinect V2カメラを用いて、CTシミュレータの中心や治療室のアイソセンターに置かれたファントムを一回撮影するだけで、自動的にカメラの設置位置と角度を較正するアルゴリズムを開発しました³⁾。

3.3 生物学的等価線量に関連する研究

放射線治療で用いられる治療計画は、物理線量で作成した治療計画が、照射の中断や治療期間の延長等が起らないことを前提にしています。しかし実際は、治療装置のインターロック等による照射の中断や、患者さんの体調不良等による治療期間の予期せぬ延長が起りえます。そこで我々のグループでは、照射中に中断が起こった場合に予測される生物学的等価線量 (BED) の減少量を評価し、中断時間に応じて計画時のBEDと同じ線量を補償できる治療計画法の開発を行っています。また治療期間の延長が起こった場合に予測されるBEDの減少量の評価と補償ができるシステムの開発を行っています。このテーマは放射線治療機器メーカーから研究助成を受け共同研究として推進しており、広島大学の医学物理研究テーマの柱の一つとなっています。

物理線量とBEDの関係はここで述べた線量値そのものだけではなく、治療計画で使用するマージンにも影響を及ぼします。我々のグループでは、SBRTの平坦でない線量分布を用いる際に、セットアップの位置誤差とBED分布の形状によって実効的に必要なマージンを定量的に評価し、従来の物理線量に基づいて提案されたdosimetric marginの考え方をBEDの場合に拡張したbiological dosimetric marginを開発しました⁴⁾。

3.4 人工知能を用いた研究

ここまで我々が行ってきた研究テーマについていくつか紹介しましたが、近年は人工知能を用いた研究が広島大学の医学物理研究の大きな柱となっています。我々のグループでは人工知能を用いた予後予測、画像生成、セグメンテーション等の研究を幅広く展開しており、これらのテーマに興味を持って入学してくれる大学院生が増えています。最近の例として、人工知能を用いた頭頸部CT画像を用いたセグメンテーション法の開発を紹介します。セグメンテーションでは一回の処理で臓器の輪郭を完成するのが一般的ですが、我々のグループでは、第一段階で臓器の位置する領域を絞り込み、第二段階で輪郭を完成するstepwise-netと呼ばれる新しい深層ニューラルネットワークを開発しました⁵⁾。セグメンテーションに関する研究は現在も進めており、様々な新システムの開発に取り組んでいます。またこれ以外の予後予測や画像生成をはじめとする人工知能を用いた研究は、国内外の企業や大学、また学内の他診療科との共同研究を積極的に展開しており、さらなる拡充が期待されます。

ここまで一部の研究テーマについて紹介しましたが、広島大学ではこのほかにも様々な研究を展開しており、多くの大学院生が活躍しています。在籍中は年に2回の研究発表会で半年分の研究進捗報告のプレゼンテーションをする機会があり、放射線治療科の医師や診療放射線技師も参加する発表会で15分程度のプレゼンテーションを行い、活発な質疑応答が行われます。JSMPやAAPMをはじめとする国内外の学会で発表を行い、欧文誌に数多くの論文を発表しています。詳しくは医学物理研究グループの業績一覧https://housya.hiroshima-u.ac.jp/medical_physics/result/をご参照いただきたいと思います。

4. 研究者の日常

広島大学の医学物理士は、週3日間は臨床業務に携わり、残りの2日間を研究教育に充てる時間としています。臨床業務ではVMAT治療計画・転送、各種検証(3D-CRT独立計算、VMAT独立検証測定)、治療開始前の最終チェック

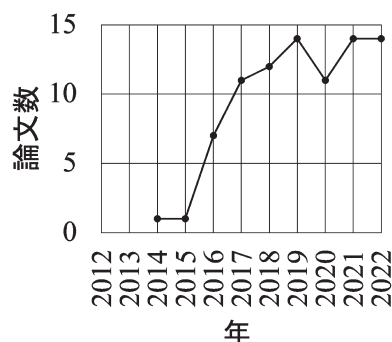


図2 研究論文数

表1 広島大学病院放射線治療科医学物理士が参加するカンファレンス

曜日	時間	カンファレンス	参加者				
			医師	医学物理士	診療放射線技師	看護師	大学院生
月	8:15-8:45	医局会	○	○			
火	8:00-8:30	VMATカンファレンス	○	○	○		
	17:00-18:00	症例カンファレンス	○	○	○		○
水	8:00-9:00	放射線治療部門会議	○	○	○	○	○
木	8:00-9:00	プロトコール検討会	○	○			
金	8:00-8:30	VMATカンファレンス	○	○			

等の業務を行っています。診療放射線技師から毎日品質管理担当者が1～2名割り当てられ、上記の臨床業務を共有する形で取り組んでいます。このほかに、各種新技術やシステムを導入する際のコミショニングや、業務を効率化するためのシステム開発にも積極的に取り組んでいます。また、広島大学病院はJCOGをはじめとする各種臨床試験に積極的に参加しており、施設認定を受ける際の検証も担当しています。

表1は、医学物理士が参加するカンファレンスです。症例カンファレンスや放射線治療部門会議は、臨床業務に従事するスタッフだけでなく大学院生も参加しているため、大学院の授業や研究だけでなく、放射線治療の実際の現場で行われている議論を聞く機会があります。医師・診療放射線技師と大学院生の距離が近いのも広島大学の特徴であるといえます。

このほかに、放射線治療機器メーカー各社との定例会議を数カ月に一度開催しており、現場のニーズをメーカーに伝えるだけでなく、最新機器の情報も常にアップデートし、企業との共同研究に積極的に取り組んでいます。

医学物理士は医学科5・6年次の臨床実習も担当しています。月曜日に放射線治療施設の現地ツアーを、木曜日に治療計画の実習を、それぞれ担当しています。また、医学科4年生が研究室に4カ月間配属される医学研究で指導を担当し、近年は人工知能を用いた研究テーマを行っています。

5. その他

ここまで述べたとおり、広島大学の医学物理研究グループでは幅広く様々な活動を展開しています。より詳しくは以下のホームページをご参照ください。進学相談や施設見学はいつでも歓迎しています。

・広島大学医学物理研究グループ

https://housya.hiroshima-u.ac.jp/medical_physics/

・広島大学病院放射線治療科

<https://housya.hiroshima-u.ac.jp>

・広島がん高精度放射線治療センター

<https://hiprac.jp>

6. 医学物理を志す方へ一言

医学物理の活動はたいへん幅広く、広島大学で医学物理研究に参加している大学院生の出身学部も多岐にわたります。広島大学では特に医学物理の臨床応用を目的とした研究テーマに、臨床現場に非常に近い環境で取り組める強みがあります。そのなかでも、近年急速に発展している人工知能を用いた研究は特に力を入れて取り組んでいます。そのほかにも、放射線治療の臨床における評価研究、シミュレーション研究、各種システムやアルゴリズムの開発等、大学院生の興味等に応じて様々な研究テーマを選べる環境が整っています。広島大学での医学物理の活動を通して、自ら課題に取り組み解決する喜びを一人でも多くの大学院生と共有したいと思っています。

参考文献

- 1) Shiba E, Saito A, Furumi M, et al.: Predictive gamma passing rate for three-dimensional dose verification with finite detector elements via improved dose uncertainty potential accumulation model. Med. Phys. 47: 1349–1356, 2020
- 2) Matsuura T, Kawahara D, Saito A, et al.: A synthesized gamma distribution-based patient-specific VMAT QA using a generative adversarial network. Med. Phys. In press. DOI:10.1002/mp.16210
- 3) Saito A, Ohashi A, Nishio T, et al.: Automatic calibration of an arbitrarily-set near-infrared camera for patient surface respiratory monitoring. Med. Phys. 46: 1163–1174, 2019
- 4) Kawahara D, Saito A, Ozawa S, et al.: Assessment of biological dosimetric margin for stereotactic body radiation therapy. J. Appl. Clin. Med. Phys. 21: 31–41, 2020
- 5) Kawahara D, Tsuneda M, Ozawa S, et al.: Stepwise deep neural network (stepwise-net) for head and neck auto-segmentation on CT images. Comp. Biol. Med. 143: 105295, 2022

書評

『放射線物理学』

“Physics of Nuclear Radiations: Concepts, Techniques and Applications”

原著：Chary Rangacharyulu

共訳：遠藤 暁・和田義親

出版社：森北出版

2022年12月20日発行



本書の著者である Chary Rangacharyulu 氏は現在、カナダ Saskatchewan 大学の物理工学科の教授として活躍している第一線の研究者である。日本に何度もいらしており、日本に造詣の深い研究者でもある。私も彼の講演を聞いたことがあるが、情熱的な語り口でありながら、系統立てられてものがたいへんわかりやすく説明され感動した。原子核や放射線教育者としての長年の経験から生まれた本書は、医理工学系の学生や研究者、医学物理士、放射線技師など原子核や放射線に関わる方にぜひ読んでほしい一冊である。日本語タイトルは『放射線物理学』という単純な名称となっているが、英文のタイトルに表されているとおり、この本のねらいは、サイエンスとしての「放射線物理学」を解説するというよりは、読者に原子核や放射線の概念を理解してもらい、それを使った技術や応用に役立ててほしいというものである。

本書の構成は以下のようになっている。

1. 物理的基礎
2. 放射能
3. 原子核のエネルギー論
4. 重荷電粒子と物質の相互作用
5. 物質中の光子と電子の相互作用
6. 物質と中性子の相互作用
7. 放射線量測定の基礎
8. 放射線源
9. 放射線検出器
10. 測定技術
11. 原子核技術—その応用

第1章で物理学の基礎であるエネルギー保存則や運動量保存則の定義から説明し、第2章にて多くの実例をもとに、放射能の源について解説を行う。第3章ではエネルギー収支として、核反応を理解するための考え方が丁寧に

述べられている。そして、原子核から放出された放射線が、その種類によって物質中でどのように振る舞うのかが第4章で解説されている。第5章では光と電子の物質中での伝搬が述べられているが、放射光を利用する研究者にとって、極めて役立つ内容であろう。物質中の中性子の振る舞いは、原子核との相互作用であり、中性子のエネルギーが異なればその振る舞いも大きく異なる。この解説が第6章で行われている。第7章では、得てして曖昧になりがちな、線量測定を取り上げている。日本では馴染みのない用語や古い表現も散見されるが、専門用語やその物理的意味を丁寧に解説しており、線量測定を行うさまざまな分野の研究者が、考え方の整理をするうえで本章は役立つ。第8章はタイトルが「放射線源」となっているが、中身は加速器の説明である。加速器の一般的な原理の解説から始まり、静電加速器、線形加速器、サイクロトロン、マイクロトロン、シンクロトロンなどさまざまな種類の加速器の原理を読むことができる。第9章では、霧箱、泡箱、ガス検出器、マルチワイヤーチャンバー、半導体検出器、シンチレータそして光センサーと、複数の種類の放射線検出器の物理的な原理が解説されている。第10章では、同時計測法や飛行時間測定法など測定技術にフォーカスして述べられている。最後の第11章では、農学分野、医療分野、微量元素分析、非破壊検査と、異なる分野における原子核、放射線利用が網羅的に説明されている。各章は必ず「イントロダクション」から始まり、章の中身がどのようなものなのかを概観できるようになっている。また、各章の最後には複数の設問が掲載されており（巻末には丁寧な解答も掲載）、大学等で利用する教科書として大いに役立つであろう。放射線取扱主任者を目指す方にもぜひ読んでいただきたい。

評者：渡部浩司

（東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター）

連載コラム シカゴ通信

チリ，グアム島，チェコ，アルゼンチン

〈Chicago Report〉 Chile, Guam Island, Czech, and Argentina

素晴らしい南米のチリ

1980年代に私は初めてNIHのグラントを獲得でき、研究員として放射線技師を公募し、6人の応募者から選考委員全員一致で選んだのがマリアでした。マリアのご主人は南米チリからの研究者としてシカゴ大学に滞在していました。その後マリアはチリに戻りましたが、約20年後に私にコンタクトがあり、2004年にチリ・サンチャゴでの放射線技術と医療系検査共同学会での講演に出かけることに決めました。学会では3日間の講演でしたが、チリの方々の温かいもてなしに感謝し、パタゴニアへの2泊3日の運転手とガイド付きの旅行にでかけたのです。以下の私の記事は、主として歴史や自然と環境に関するものですので、現在にも当てはまると思っています。

チリは、南米の太平洋側の国で長さ4,329km、幅は平均175kmの細長い国です。東側はアンデス山脈、西側は太平洋に面しています。チリの北端は亜熱帯で砂漠があり、南端は南極のそばのマゼラン海峡です。チリの中ほどにある首都のサンチャゴは温暖な気候です。チリの人口は約2,000万人、領土は日本の約2倍です。人種はスペイン系とほかの白人とその混血が97%です。輸出は、鉄、銅などの鉱物資源ですが、日本と同様に海産物は豊富です。チリは100年以上外国と戦争をしていないユニークで豊か

な国です。

サンチャゴは、太平洋岸から約120km内陸に入ったところで、標高520m、年間を通して温暖な気候で年間300日晴天です。しかし排気ガス汚染がひどく午後になると山が見えなくなりますが、土曜日の午前中は高台のサン・クリストバルの丘からサンチャゴの街や“かすかに見える”アコンカグア（写真1）を眺めることができます。アコンカグアまでは約100kmの距離です。

チリについての私の記憶に残っているのは、1973年に軍事クーデターが起こり、アジェンデ大統領が激しい銃撃戦の結果モネダ宮殿（写真2）で自殺し、ピノチェト陸軍総司令官が大統領に就任したことです。しかし、1989年の総選挙で反軍政府派が圧勝、ピノチェトが敗北してこの事件は終了したのです。そこで、マリアがシカゴに滞在したのは、ピノチェトの軍事政権時代だったことがわかります。チリの政情は安定している印象でしたが、最近若い政権に大きく舵きりしています（追加記事後述）。

サンチャゴ訪問の魅力の一つは、有名な中央市場（写真3）です。この巨大な市場には、全ての食材がありますが、魚介類（写真4）は特に素晴らしいです。エリッソ（ウニ）、ロコ（肉厚のアワビ）、ジャイパ（カニ）、アルメハ（ハマグリ）、チョルガ（ムール貝）、ピコロコ（巨大なフジツボ）、コングリオ（アナゴ）などがあり、海鮮食堂

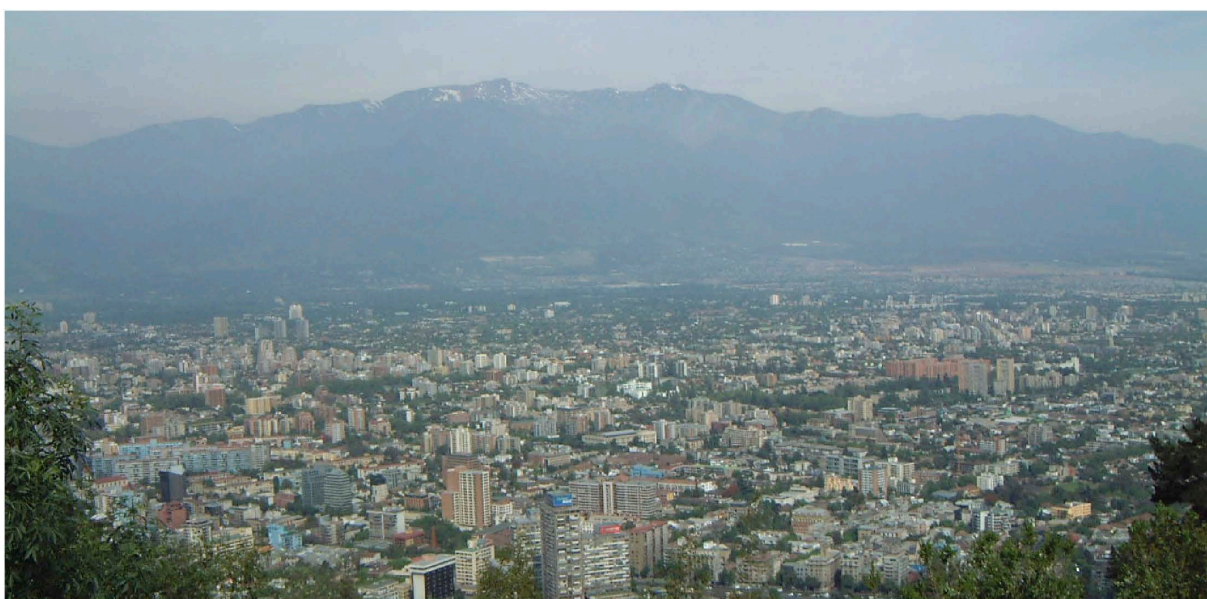


写真1 南米チリ・サンチャゴの大都会と南米大陸の巨大なアンデス山脈：中央左上は“大気汚染でかすかに見える”雪溪の残るアコンカグア(6,960m)



写真2 チリ・サンチャゴのモネダ宮殿：1973年に軍事クーデターが起こった場所



写真3 チリ・サンチャゴの中央市場：左端は残雪のアコンカグア



写真4 チリの海鮮料理の豊富な材料（タコ、ウニ、フジツボ、ムール貝、アジ、サーモン）

ではソバ・マリスコスという貝たくさんの海鮮スープや新鮮な生の魚介類（刺身のような）を楽しめます。

サンチャゴから太平洋側に自動車で約2時間の距離の海岸にビーニャ・デル・マー（写真5）とバルパライソとい

う隣接した美しい町があります。バルパライソは、“天国のような谷”という意味です。しかし、1960年5月22日19時11分にチリ地震が起こったのです。チリ地震は、マグニチュード9.5で観測史上世界最大級のものでした。こ



写真5 チリ・サンチャゴ郊外ビーニャ・デル・マーの美しい海岸：右端は隣街のバルパライソ



写真6 チリ南部パタゴニア地方のサーモンの稚魚養殖湖

の美しい海岸では、突然海面が沖に移動し始め、海底が見えだしたために“多くの人は珍しさから海底に向かって歩き始めた”そうです。しかし、その直後に津波が押し寄せ多くの方は犠牲になったのです。2日後には日本でもチリ地震による6mの津波で岩手県などの海岸では142人が亡くなりました。このチリ地震では死者6,000人でしたが、2011年の東日本大震災では約2万人が犠牲になっています。1755年のリスボンの大地震の犠牲者は6万人ですので、地震の恐怖は今も地球上に継続していることが明らかです。

サンチャゴでの会議の終了後に、チリ南部のパタゴニアの始まる地域に出かけました。サンチャゴは夏でしたが、パタゴニアで突然、冬の気候へ変化し大変な驚きでした。この地域で有名なのはサーモンの養殖です。サーモンの稚魚は湖（写真6）で育てられ一定の大きさになると海の養魚場に移すのです。その移動は大型トラックの水槽です

が、時々高速道路に20cm程の“干乾びた”サーモンの稚魚を見つけた時にはびっくりしました。これはトラックの水槽から飛び出した魚です。

この地域には以前多くの巨木が生えていたのですが、開拓にはドイツからの移民が重要な役割を果たしたそうで、現在ドイツ村があります。この巨木を切り倒し平地にするためには、当時ノコギリしか手段がなかったと想像します。しかし、チェーンソーの発明は1840年頃のドイツ人ですので、「この地域の開拓者はチェーンソー発明の動機や機械の試作に何らかの貢献」をしたのではないかと想像しています。現在のチェーンソーは凄い機械で、シカゴ自宅庭にある直径1mの木を一人で1分以内に容易に切ることができます。ただし、大きな木を切るには多数に分割して切る必要があります。私は個人的に“チェーンソーは人類の大発明の一つ”と思っています。チェーンソーがなければ、大量の建築木材を入手することは不可能と思いま

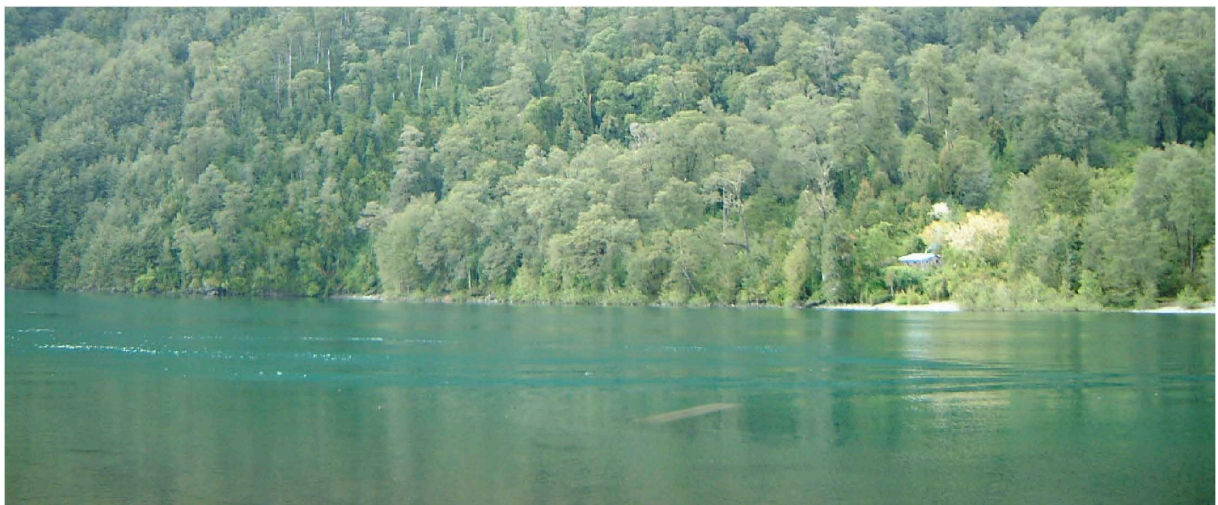


写真7 チリ・パタゴニアのエメラルド・グリーン湖



写真8 チリ・パタゴニアの“チリ富士”と言われる万年雪のオソルノ活火山

す。

パタゴニアで驚いたのは、エメラルド・グリーン色の美しい湖（写真7）です。この湖から流れる河の注ぐ“河口近くの海”も同じエメラルド・グリーンだそうです。この色の原因は、氷河が岩石を削り取り、その結果の“微細な粉末”の色だそうです。私は、このような景色を世界中のどこでも見たことがありません。微細な粉末についてはアラスカのマタヌスカ氷河を訪ねた時に、氷河末端近くの土砂は、今まで見たことのない“物凄く細かい灰黒色の粉末”だったために、靴にまわり付いたことを思い出しました。しかし、この粉末が氷河に関係する物質であり、川に流れ込むと“どのような色の池になるか”予測できませんが、興味ある疑問です。

パタゴニアには、“チリ富士”と呼ばれる夏でもスキーのできるオソルノ活火山（写真8）があります。我々の訪問中には他の客はいなかったのですが、デモをしたいとのことでアノラックを借用してリフト往復を楽しみました。その後、海岸地帯へ行き、クジラ、オットセイや多くの海鳥のいる島の見物（写真9）に“小さな船”で出かけまし



写真9 パタゴニアのクジラや海鳥見物：2人のトラベルガイドと上船準備
我々の被っている帽子はパタゴニアで入手、18年後の現在も愛用中

た。冷たい海ですので危険は承知でしたが、無事帰着した時にはホッとしました。

チリ訪問で思い出すのは、1830年代英国のチャールズ・ダーウィン(1809～1884)が3年間にわたる世界一周旅行中にチリを訪問し長期間滞在したことです。ダーウィ

ンはバルパライソに上陸し、その後サンチャゴから内陸部を大旅行しネズミや植物などの採取をしています。ダーウィンは、その後ガラパゴス諸島を訪問しゾウガメを持ち帰ったのです。驚いたことに、このゾウガメは2006年（175歳）まで生きていたそうです。ダーウィンは「環境の変化に順応できる者だけが生き残る」という進化論を提唱し、「種の起源」を著作したことで知られています。

初めてのチリ訪問は、我々にとって期待以上の素晴らしい経験でした。世界の他の国では得られない“チリにしかない経験”をしたとの印象です。海鮮料理だけでなく、見たことのない自然や景色に加えて、チリの人々の温かさを感じました。

この原稿の用意の後、2022年9月12日付TIME誌に、チリの新大統領36歳のガブリエル・ボーリックに関する記事が出ていました。興味ある新事実としますので概略を追加します。チリでは、我々の滞在中には気がつかなかったのですが、貧富の差が激しく不平等のため、最近暴動などで多数の死者を出すほどだったそうです。その後2021年の選挙で若い大統領が選ばれたのです。ボーリックは進歩的ですが、極端な左翼とは違い建設的で柔軟性のある方ようです。大統領館ではなく中産階級の街に住みノーネクタイのスタイルで近所の買い物に出かけ護衛は心配だそうですが、今までにない新しい指導者です。チリの憲法改正が大きな仕事ですが、今後世界が注目し値する若い世代の指導者と思います。



写真10 チリの新大統領ガブリエル・ボーリック(36)
(TIME, Vol.200 No.9, Sep.12, 2022より)

自然と人工のバランスのグアム島

グアム島は東京から飛行機で約4時間の距離にある、日本から最も近い米国の領土です。グアム島には多数の美しいビーチがありますが、「多くのビーチにはほとんど人がいない」のは不思議な感じがします。人がいない理由は「多数のビーチへ行くにはレンタカーが必要」だからだと思います。我々は2017年と2018年にグアム島を訪問しましたが、「グアム島ビーチは世界最高レベル」と思うほど素晴らしいです。今まで我々が訪問した日本の石垣島と宮古島や東南アジアの島々、地中海沿岸やカリブ海の島々とくらべた結果、2年続けて訪問したのはグアム島だけです。グアム飛行場の近くにはタモン湾（写真11、12）があり、多数のホテル、レストランや商業施設もその周囲に集中していますので、多数の観光客はこの付近に滞在します。しかしレンタカーを利用すれば、行動範囲はグアム島全体に広がります。グアム島には多くのジャングルや海辺があり素晴らしい自然が残っています。

グアム島の形はピーナッツの殻のようで、幅15km、長さ50km程の大きさです。人口は約16万人ですが、旅行者は年間約100万人です。人種は、チョモロ人45%、フィリピン系25%です。島の所属は米国ですが準州と呼ばれています。歴史的には1521年にマゼランによって発見され、その後スペインが支配し、1898年からは米国の植民地でした。しかし、後述のように第2次世界大戦のはじめの短期間だけ日本の支配下にありました。

グアム島は、北海道の知床半島とほぼ同じ東経度の位置で、フィリピンのマニラとほぼ同じ北緯度です。グアム島に一番近い国はフィリピンです。グアム島は、マリアナ諸島とミクロネシア領域で最大の島なので、アジアの広大な地域での戦略的に重要な拠点です。実際、日本との第2次世界大戦後半と更にベトナム戦争では、米軍はグアム島を基地として爆撃したそうです。

グアム島で面白いと思われるのは海中観察室(Fish Eye Marine Park)（写真13）です。海岸から約400mの位置の海底の観察室から眺める多数の魚（写真14）は見事です。世界各地には、船底にガラス窓を設置した海底観察船がありますが、一般に魚を探すのは容易ではありません。魚が見つからない場合もあります。しかし、グアム島の海中観察室では、餌を撒いて魚を集めることができるので、我々が訪問した時には約20～30cmの多数の魚を見ることができました。大きな魚の群れにはびっくりです。

海水浴やスノーケリングのできる海岸はグアム島に多数ありますが、ほとんど人影を見ないのは不思議な感じがします。海水浴や日光浴をしている若者たちを見たのは、北端のリティディアン岬ビーチ（写真15）とグアム島南端



写真11 グアム島タモン湾左端のマリオットリゾート（手前後方）から眺めるビーチ：
白波はサンゴ礁の位置，薄い水色は白砂領域，濃い部分は熱帯魚のいるサンゴ礁や岩石領域



写真12 タモン湾左端の海岸から外洋の景色：白波の手前はサンゴ礁で囲まれた浅く穏やかで熱帯魚のいる領域，濃い青は外洋，
中央付近の右手絶壁は恋人岬

のメリッツォでした。リティディアン岬ビーチはかなり離れた地域にあり、ビーチまでの最後の数kmの道路は最悪の状態でした。アスファルト道路は大きな穴だらけで、世界最悪とも思えるような悪路でした。しかし、交通量がほとんどないので安全性には問題ありません。このビーチはサンゴ礁で囲まれた素晴らしい白砂の海辺で、スノーケリングで熱帯魚と一緒に泳ぐのはとても楽しいです。ただしシャワー等の施設はありません。

グアム島南端のメリッツォ（写真16）には、道路の近くに船着き場と若干の商店があります。海釣り客のための小さな桟橋があり、その近くで子供たちが泳いでいましたが、ここでもスノーケリングを楽しむことができました。

沖には小さな島が見えましたが、無人島かもしれません。

グアム島では、アウトバックというステーキ屋でウェイターと仲良しになり、人気レストランを教えてもらい、地元でベストの小さなレストランでの食事（写真17）を楽しみました。このレストランのシェフは、パリの一流レストランで修業した経験者で、“さすが”と思うほど素晴らしい料理でした。

1941年12月8日に日本軍の真珠湾攻撃で第2次世界大戦は始まったのですが、その5時間後にグアム島にも攻撃し2日後にはグアム島は降伏したのです。その後2年7か月間は日本軍がグアム島を占領・統治していました。そこで一時はかなりの数の日本人兵士がグアム島に滞在してい

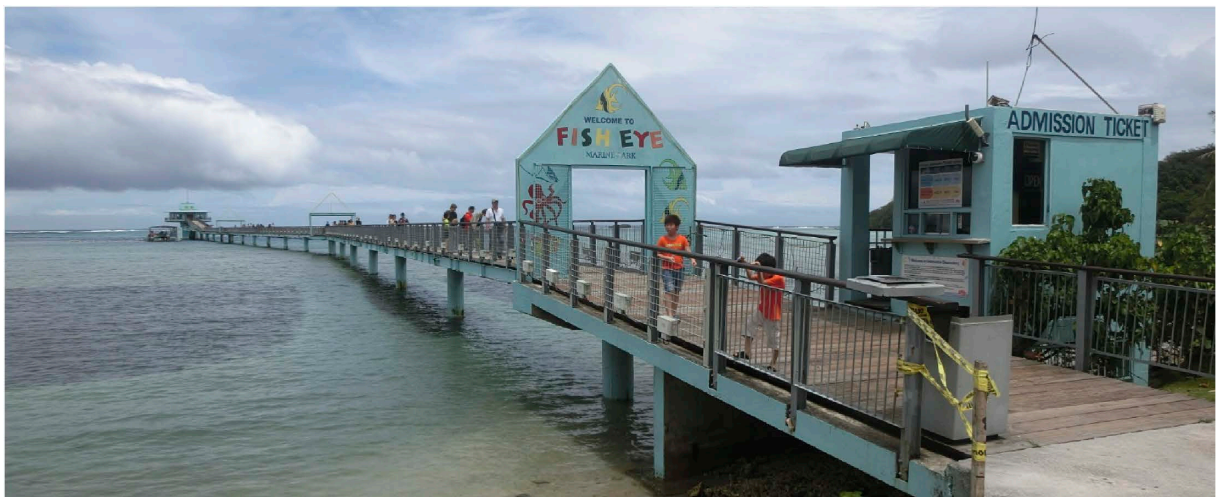


写真13 海に泳いでいる魚を海中から眺めることのできる海中観覧塔 (Fish Eye Marine Park)



写真14 海面から約10mの深さの海にいる魚

たそうです。しかし1944年8月に米国がグアム島を奪還して多くの日本兵はジャングルに逃亡したのです。その数は約2,000人と推定されています。

その後1972年、戦争終結から28年後に旧日本兵の横井庄一さんがジャングルの中から見つかったのです。これは奇跡的な生還と、日本だけでなく世界中に特別なニュースとして伝わりました。横井さんは「恥ずかしながら帰って参りました」と挨拶し、その年の流行語になったそうです。このようなことが起こったのは日本の軍事教育で「生きて本土へ帰らぬ決意」を教えられていたからだと思います。そこで多くの日本人は「まだ戦争は終わっていないかった」という現実を突き付けられたのです。これは大変悲しいことですが、歴史上の事実です。この横井さんに関する記事は現在インターネットで容易にアクセスできます。なお、グアム島の横井さんの住んでいた「ヨコイ・ケーブ」は現在私有地のため、付近まで行けませんが見学はできません。

宇都宮の私のチカヒラ叔父は第2次世界大戦中に南方の島に派遣され無事帰国していました。戦後10年程経ってから、東京の私の母と戦時中の兄妹たちの思い出話をし、叔父は最後には戦死した多くの戦友を想い「サーラバ、ラバウルよ、また来る日一まーで…」とラバウル小唄を泣きながら歌ったのです。私は生涯その時の様子を忘れたことはありません。当時高校生の私には、残念ながら叔父の気持ちを十分理解することはできなかったと思いますが、悲しさと同時に自分はこれから「日本をなんとかする」と強い決意をしたのです。

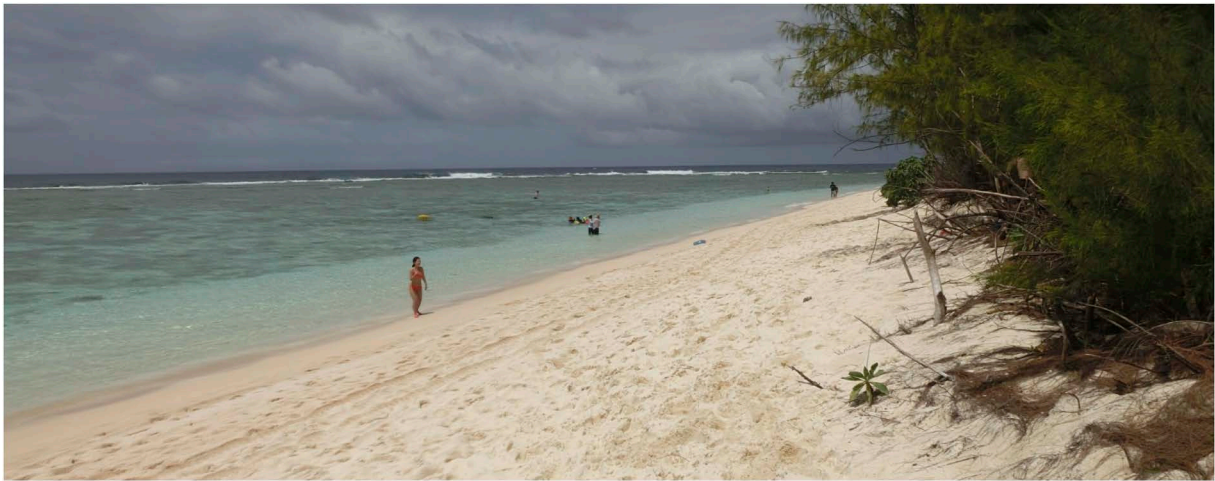


写真15 グアム島北端のリティディアン岬ビーチ：遠方の白波はサンゴ礁の位置



写真16 グアム島南端のメリッツォ栈橋：釣船の乗客と手前の海に子供達



写真17 グアム島地元人気レストランの海鮮料理と肉料理

若い方へのアドバイス

英語が得意でないという理由でグアム島を敬遠する可能性があります。しかし、反対に、グアム島を利用して英会話を上達するチャンスと考えることもできます。グアム島への旅行では複雑な会話は必要ありません。例えば、必要なのは飛行場での会話、更にホテルや買物、レンタカーやガソリンスタンド、レストランやファーストフードなどです。そこで渡航前に友人達と会話の準備や練習が可能だと思います。

日本では3人宿泊すると3人分の料金が要求されます。しかし外国ではツインの部屋を利用して簡易ベッドを追加すればツイン料金です。ただし3人をアクセプトするホテルは少ないです。個人でホテル予約をすれば、ホテル代金は大幅に節約できます。更に全てを自分でやることで経験が増え、外国旅行の準備にもなります。

チェコの美しい街ブラハ

チェコの首都ブラハはヨーロッパの歴史で重要な役割を果たし、神聖ローマ帝国（11～16世紀）の時代には最も繁栄した素晴らしい都市として知られています。現在でも、14～18世紀に繁栄した都市や建造物が残っているのです。パリ、ロンドン、ローマは巨大な観光都市として知られていますが、ブラハは華麗な建造物が多数残っている驚くほど見事に纏まっている世界最高の小都市です。その中心はブラハ城（写真18）と旧市街ですが、この両者を結ぶカレル橋（写真19）は絶えず多数の観光客のため写真を撮るのが困難なほどです。

ブラハは建築の街とも呼ばれていますが、ロマネスク

（10～13世紀）からゴシック（12～15世紀）、ルネッサンス（15～16世紀）、バロック（17～18世紀）、アールヌーボー（19～20世紀）、現代建築まで世界で最も美しいと思われる建物が比較的小さな地域（写真20, 21, 22）に集まっていますので、ほとんど徒歩で見学できます。

ブラハ城（写真18）は、王宮、大統領執務室、巨大な教会、美術館、庁舎、庭園や小さな町があり世界最大の王宮街（1775年完成）です。ブラハは古くからボヘミアの首都でしたが、14世紀には神聖ローマ帝国の中心でカール4世はチェコの黄金時代を築き、16世紀にはハプスブルグ家が率いる中心地でした。

1918年には第1次世界大戦の後、ブラハはチェコスロバキアの首都となり、更に第2次世界大戦の後にはソ連の

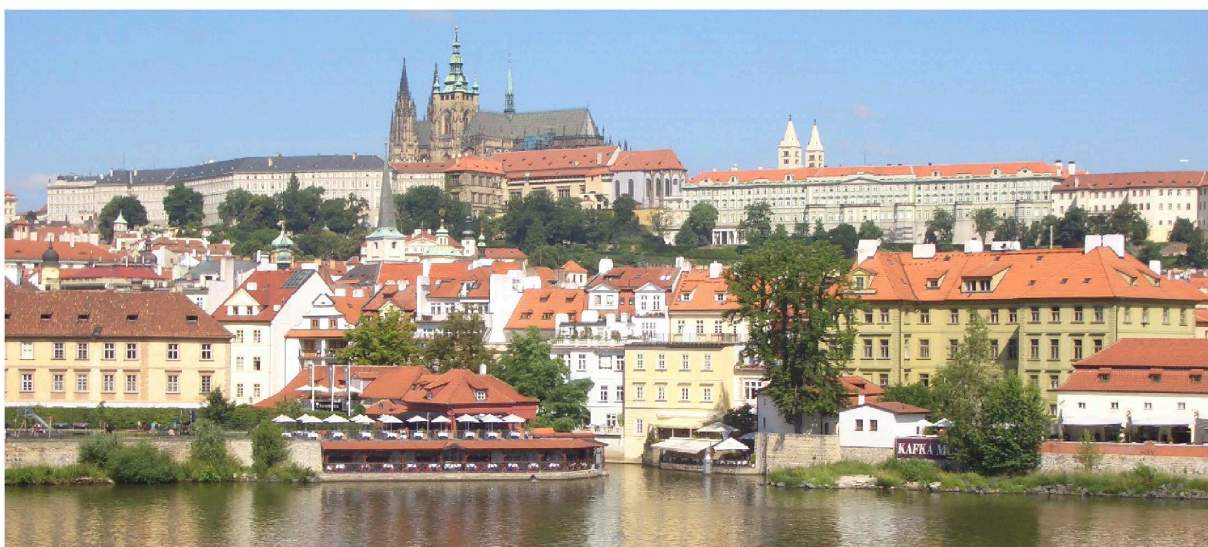


写真18 巨大なブラハ城の全景とヴォルタヴァ川



写真19 ヴォルタヴァ川に架かるカレル橋とブラハ市の遠景



写真20 旧市街広場に建つゴシック、ルネッサンス、バロック様式の建物：
左から石の鐘の家、ティーン学校、ティーン教会入口、後方はティーン教会



写真21 優雅なロココ様式のゴルツ・キンスキー宮殿

影響下に置かれ、共産党が政権奪取し社会主義政策がすすめられたのです。1968年には“プラハの春”と呼ばれる国民運動が起こりましたが、ソ連の軍事介入によって全土が占領・弾圧されました。しかし、1989年にはベルリンの壁崩壊を受け、民主化を要求した学生デモに端を発し、警官隊の暴行事件から大規模な街頭デモによって無血革命で共産党政権が倒れたのです。その後、自由選挙が行われチェコ共和国が誕生し、NATOやEUに参加できました。そこで、現在多くの国からチェコに自由に入出国でき、今まで見ることでできなかった中世からの素晴らしい世界遺産を訪れることができるようになったのです。

我々は2011年ベルリンでのCARSの会議後にプラハを訪問したのですが、プラハに残っている中世からの美しい街と素晴らしい建造物にとっても驚きました。これほど多くの見事な世界遺産が保存されている小さな都市は、世界中でプラハだけだと思います。チェコの面積は日本の5分の1で、人口は約1,000万人です。そこでチェコの人口は極めて少なく、多分そのためかもしれませんが、プラハの街は外国からの訪問客であふれているように思えました。

プラハ最古のカレル橋(520m)はあまりに観光客が多いので、橋の写真を撮るのをあきらめたのですが、橋の全景(写真19)はプラハの街の西の丘陵地帯からの撮影です。

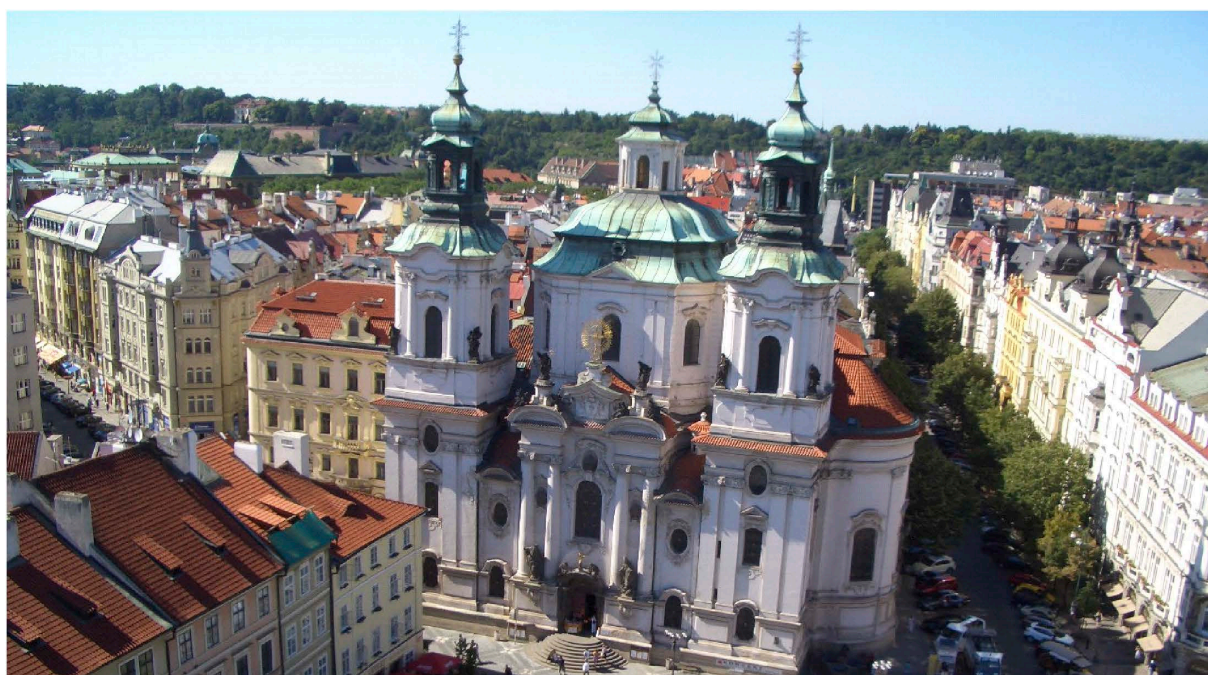


写真22 見事なバロック様式の聖ミクラーシュ教会



写真23 旧市庁舎の天文時計

カレル橋は1357年に着工し、60年かけて完成したそうです。カレル橋の有名なのは左右の欄干に両側全部で30体の素晴らしく見事で精巧な聖人像と使徒達が並べられています。そのなかには、日本を訪問した聖ザビエルも含まれています。

プラハの心臓部は、旧市街広場（写真20）です。ここ

は、信じられないほど多くの素晴らしい建造物で囲まれています。ゴルツ・キンスキー宮殿（写真21）は、ゴルツ伯爵による優雅なロココ式宮殿で、現在は国立美術館の企画室に使用されています。聖ミクラーシュ教会（写真22）は、バロック様式で荘厳な雰囲気漂わせています。華麗な天井画やバロック様式の彫刻で有名ですが、夏の夜にはコンサートが開かれます。

プラハの旧市庁舎で有名なのは、1490年頃に造られた珍しい天文時計（写真23）です。縦に二つの文字盤が並んでおり、上は地球を中心に回る太陽と月の動きと時間を表し、年月日と時間を示しながら1年かけて一周するものです。下は黄道12宮と農村における四季の作業を描いた暦です。9～21時の正時には、キリストの12使徒の像が窓の中にゆっくりと順番に表れて、最後に一番上の鶏が鳴いて終わるのです。このような時計で簡単なものは、現在ドイツのミュンヘンや世界各地にあります。プラハの天文時計は世界でも稀な見事な時計です。

プラハには“王の道”と呼ばれる2,500mの歴史的な道があります。これは13世紀から4世紀にわたって歴代の王が戴冠パレードを行ってきた道です。旧市街の火薬塔から始まりカレル橋を渡ってプラハ城まで荘厳で華麗なものだったそうです。その当時市内には番地がなかったため、人々は家の正面に紋章をつけていたのです。王の道の両側の家には、それらの紋章が現在も残っています。それらはライオン（写真24A）、金の蛇（写真24B）、赤い狐等ユーモアを感じるものです。

プラハを代表すると言われる豪華な市民会館（写真25）



(A)



(B)

写真24 “王の道”に並ぶ家々の紋章：(A)ライオン、(B)金の蛇

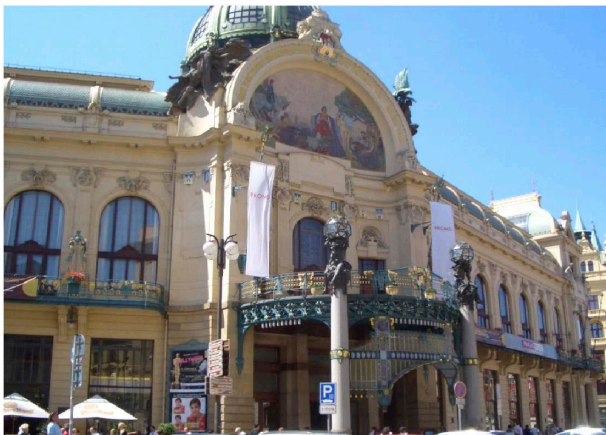


写真25 プラハを代表するとされる市民会館

は、1911年に完成しています。この会館は文化的な公共サービスのできることを目的としています。そこで、音楽祭「プラハの春」の会場となるスメタナ・ホール、小ホール、サロン、カフェ、レストランがあり、内部はチェコの芸術家たちによる壁を埋め尽くす巨大な絵、パイプオルガンやアールヌーボーの華麗な装飾が施されています。

旧市庁舎に近くの建物で“1分の家”（写真26）と地球案内本に記述されている建物があります。しかし、この建物は“minutely detailed”と英文では記述されていますので、明らかな誤訳で、正確には“精細な”という意味です。別のインターネット記事では“ミヌタ館”と記述されていますが、これも不適切です。この家には、フランツ・カフカ(1883～1924)が幼少期に住んでいたそうです。カフカは、「変身」、「審判」、「城」などで死後世界的に有名ですが、生前はほぼ無名の作家です。偉大な先駆者の中には、このような共通点があるのは大変な驚きです。なお、この建物は一見地味に見えますが、多数の詳細な浮き彫りと巧みな彩色で品の良さを示していますので、大変目立つ建物だと



写真26 カフカの住んだルネッサンス様式の精細な家

思います。

プラハには多数のホテルがありますが、hotels.com等のインターネットで容易に探し予約することができます。我々はUNITAS（\$126、9/4/2022調査）に滞在しましたが、これは以前修道院病院だった施設で、旧市街に近く極めて便利で、小綺麗な素晴らしいホテルでした。昼食や夕食は近所の多数のレストランの“大きく書かれているメニュー看板”を眺めて容易に選択できます。

プラハの街は“別世界に来たような錯覚を覚えるほど”街中にある石作りの豪華な装飾の建物に圧倒されます。プラハは「世界一華麗な中世都市」を維持していると思います。

タンゴのアルゼンチン

私は新宿高校や早稲田大学の青春時代に新宿を地元とする地域で育ったために、その影響を受けていると感じています。1960年代によく知られていたのはシャンソン喫茶ラメールやタンゴ喫茶でした。タンゴ喫茶では藤沢ランコ(1925~2013)と早川真平のバンドネオンだったのです。現在調べてみると藤沢ランコは日本だけでなくアルゼンチンでも有名なタンゴ歌手でした。後述のアルゼンチンのペロン大統領の主催する慈善晩餐会に出席していたのです。

1980年代からブラジルの会議や大学での講義などで、私はサンパウロを何度か訪問するチャンスがありました。その時サンパウロ飛行場で“Next flight to Buenos Aires”と女性のソフトで低音の魅力的なアナウンスを聞き“天使の声”のように感じ、将来Buenos Airesを訪問したいと思っていました。それが2001年のICR(国際医学放

射線学会)の開催で実現したのです。

アルゼンチンはブラジルの南から南極近くのパタゴニアまで広がっており、チリの東側の位置です。そこで広大な土地を有する国であることは明らかです。面積は日本の約7.4倍、人口は約4,600万人です。首都のブエノスアイレスの人口は300万人ですが、郊外を含むと1,500万人と5倍に増加し国全体の約30%が首都圏に住んでいます。ブエノスアイレスの街(写真27)はホテルから眺めた風景です。ヨーロッパ風の建物が目につきますが、高層建築はほとんど見当たりません。

アルゼンチンで有名なのはタンゴのダンスですが、タンゴに対する情熱は想像を絶するレベルだと思います。タンゴの発祥はカミニート(写真28)で、極彩色の家の集まっている観光地になっています。週末には街角でタンゴを踊るカップル(写真29)が登場し、これを見物する大勢が熱心に取り囲む様子にはとても驚きます。しかし、本場の



写真27 ホテルから眺めるブエノスアイレスの街



写真28 カミニートのカラフルな住宅と週末の街のタンゴに集まった人々

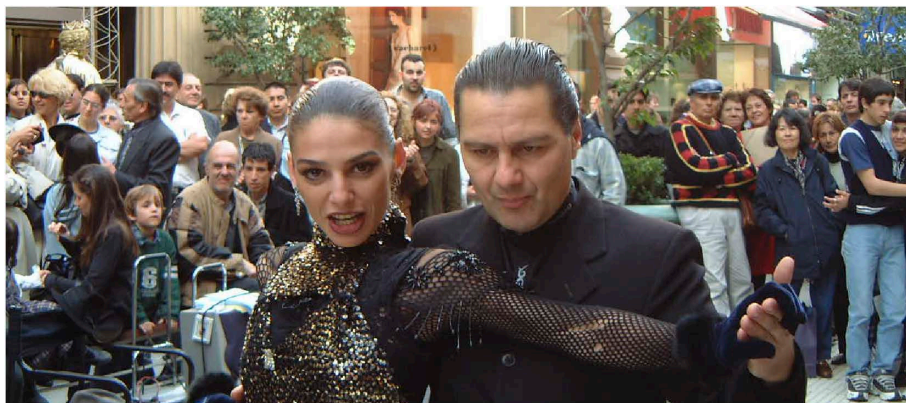


写真29 ブエノスアイレスの街中に見られる週末のタンゴ



写真30 ブエノスアイレスのディナーショーでのタンゴ



写真32 レコレータ墓地エビータの墓



写真31 エビータ（エバ）・ペロン

アルゼンチン・タンゴのダンスの鑑賞は多くのライブハウスや小劇場（写真30）で飲み物や食事を楽しみながら、バンドワゴンの演奏や官能的なタンゴの踊りを楽しむこと

ができます。地元の方によると、一流のダンサーは外国へ出かけているのでブエノスアイレスで踊るのは次のレベルの方々だそうです。現在はインターネットで最高レベルの素晴らしいタンゴのビデオ（例：Planetango2016）を鑑賞することができます。

アルゼンチンだけでなく“世界史の中で特筆すべき”人物は、エビータ（エバ）・ペロン（1919～1952、写真31）だと思います。エバは私生児として生まれ、極貧の中で育ったのですが、16歳でブエノスアイレスに出てラジオや映画で活躍します。ペロン大佐とは1944年（ペロン48歳、エバ24歳）に会い、翌年結婚し、その後エバのラジオによる強力な支援もありペロンは大統領に当選します。エバは貧しい人々を支援するためにエバ・ペロン財団を創設し、多くの慈善事業を実行しました。労働者の住宅建設、養護施設、孤児院、病院の建設、更に毛布、食料、靴、ミシン、調理ナベなどを毎年50万人に与えたのです。



写真33 アルゼンチン地図

エバは1日20時間も働き、そのため1952年33歳の若さで子宮癌のため早死したとも言われています。

エバはより良い世界への信念を持っており、自己犠牲的で魅力的な人だったと言われています。アルゼンチンでは、エバの時代が唯一“国民不平等のなかった時代”とされているそうです。このような人を“世界中のどの国の、どの時代でも”見いだすのは困難だと思います。エバは国民に絶大な人気があったので、その葬儀にはアルゼンチン全土から300万人が参列したそうです。これを、最近の英国エリザベス女王葬儀参列者100万人と比べると3倍も多いのに驚きます。エビータ・ペロンの人気は、想像を絶するものがあったと思います。我々はエバの墓（写真32）を訪問したのですが、死後48年経っても沢山の花束が添えてあったのには驚きました。1996年には米国でエバ・ペロンに関するマドンナ主演のハリウッド映画「エビータ」が制作されました。アカデミー賞受賞曲“Don't Cry for me Argentina”は素晴らしい名曲だと思います。インターネットでは、多数の欧米女性歌手の驚くほど美し



写真34 バルデス半島のヌエボ湾（クジラの産卵及び子育て場）で海岸に近づくクジラを眺める人々



写真35 バルデス半島近くのプエルト・マドリンの街（ホテルの窓からの景色）



写真36 バルデス半島の絶壁の海岸：手前下に多数のアザラシ



写真37 バルデス半島の海岸にいるゾウアザラシ (sea elephant, 5m, 3t)のハーレム

い歌声を聞くことができます。

ブエノスアイレス訪問の後、パタゴニアの始まる地域のバルデス半島（写真33）を訪問しました。この半島は南米大陸の出島のような形で、その根元近くには2つの巨大な（直径約50kmと20km）円形の湾が反対側にあります。2つの湾の間の距離は10kmと接近しています。これは地球創成期に巨大な隕石の落下によってできたと聞いています。この湾はクジラが産卵と子育てをする場所だそうです。この湾は海岸から急に深くなり、海岸近く（10m程）までのクジラの接近（写真34）を観察できるのは大変な驚きです。

ホテルの窓からは、クジラが6回も連続ジャンプするのを何度も見ることはできましたが、これは凄い経験だったと思っています。私は世界中にこのようなクジラの連続

ジャンプを観察できる場所を聞いたことがありません。ホテルはプエルト・マドリン（写真35）という小さな町に滞在したのですが、一晩中ガタガタと強い風の音に悩まされ“風の強い”パタゴニアを体験していると感じました。

バルデス半島はゾウアザラシでも知られています。絶壁の上からゾウアザラシの群（写真36、37）を見つけた時にはびっくりしました。崖沿いの小道を下って海辺で寝そべっているゾウアザラシ・ハーレムまで近づき接写できたのには大変驚きましたが、多分、動物たちは熟睡中だったと思います。

バルデス半島訪問中、パタゴニアの大樹のない平原を観光車両で走っている間に、動物（ラクダ科のグアナコ）の群を何度か遠方から眺め、写真に撮ることはできませんでしたが、多くの自然動物がいることは明らかでした。

アルゼンチンの思い出としてカルピンチョ（日本ではカピバラと呼ばれる）の手袋と靴を入手しましたが、現在も前橋で冬季に愛用しています。手触りの良いユニークなパターンのソフトな皮製品でとても気に入っています。アルゼンチンは日本から遠く離れていますが、とても魅力的で訪問する価値のある素晴らしい国だと感じています。

(2023年2月5日記 土井邦雄*)

シカゴ通信・バックナンバー

1. 世界の高層建築—パナマシティ、香港、ドバイ—. 医学物理 41: 68–72, 2021
2. 高層建築のない世界—バルト3国、コスタリカ、アイルランド、ペルーの古代インカ、古代エジプト—. 医学物理 41: 166–176, 2021
3. 世界の島国—ニュージーランド、インドネシア、タヒチ、バルカン半島諸国—. 医学物理 41: 201–213, 2021
4. 世界に誇れるスイスの素晴らしい山岳. 医学物理 42: 55–62, 2022
5. 民主主義の歴史を持つギリシャと神秘的なインド. 医学物理 42: 110–120, 2022
6. ベトナム、カンボジア、ポーランド、アラスカ. 医学物理 42: 182–199, 2022
7. ポルトガル、ハンガリー、南アフリカ、タイランド. 医学物理 42: 215–230, 2022
8. チリ、グアム島、チェコ、アルゼンチン. 医学物理 43: 26–42, 2023

予告

スペイン、フランス、ドイツ、イタリア. 医学物理 43(2) 掲載予定, 2023

土井邦雄^{1,2}

¹ シカゴ大学

² 群馬県立県民健康科学大学

Kunio Doi^{1,2}

¹ The University of Chicago

² Gunma Prefectural College of Health Sciences

*E-mail: k-doi@uchicago.edu

◀ 編 集 後 記 ▶

本号では、計測委員会の企画として日本放射線腫瘍学会小線源治療部会¹²⁵I線源強度計測課題検討ワーキンググループによる「前立腺癌密封小線源永久挿入治療におけるヨウ素125シード線源の品質保証」と題した技術報告書を掲載した。国内で使用される¹²⁵I線源は一定の品質が確保できていると認識されてきた一方で、近年、線源強度に係るインシデント事例が報告されている。本技術報告書は、近年発生した事象の防止に資する現実的かつ合理的な計測の在り方について検討されまとめられたものであり、シード治療を実施する施設の品質保証の一助となることが期待される。

(編集委員 山田崇裕)

Japanese Journal of Medical Physics

Editorial Board

T. Hasegawa (Chief)
Y. Anetai
F. Araki
R. Kohno
T. Sakae
S. Sato
S. Sugimoto
Y. Takahashi
A. Nohtomi
M. Hashimoto
T. Fujisaki
T. Magome
N. Matsufuji
Y. Mori
T. Yamada
H. Watabe

JSMP Secretariat:

c/o International Academic Publishing, Co., Ltd., 358-5
Yamabukicho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-0801, Japan
TEL: 03-6824-9384 FAX: 03-5227-8631

JSMP Editorial Office:

c/o International Academic Publishing, Co., Ltd., 332-6
Yamabuki-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-0801, Japan
TEL: 03-6824-9363 FAX: 03-5206-5332

ISSN: 1345-5354

Japanese Journal of Medical Physics [JJMP] is published four times per annual volume by the Japan Society of Medical Physics.

JJMP is indexed in Index Medicus and MEDLINE on the MEDLARS system.

医 学 物 理

編集委員長

長谷川智之 (北里大学)

編集委員

姉帯 優介 (関西医科大学)
荒木 不次男
河野 良介 (国際医療福祉大学)
榮 武二 (筑波大学)
佐藤 清香 (エレクトラ)
杉本 聡 (順天堂大学)
高橋 豊 (医薬品医療機器総合機構)
納富 昭弘 (九州大学)
橋本 成世 (北里大学)
藤崎 達也 (茨城県立医療大学)
馬込 大貴 (駒澤大学)
松藤 成弘 (量子科学技術研究開発機構)
森 祐太郎 (筑波大学)
山田 崇裕 (近畿大学)
渡部 浩司 (東北大学)

公益社団法人日本医学物理学会事務局:

〒162-0801 東京都新宿区山吹町358-5
(株) 国際文献社内
TEL: 03-6824-9384 FAX: 03-5227-8631

公益社団法人日本医学物理学会編集事務局:

〒162-0801 東京都新宿区山吹町332-6
(株) 国際文献社内
TEL: 03-6824-9363 FAX: 03-5206-5332

ISSN: 1345-5354

本誌は年1巻とし、1号、2号、3号及び4号として発行します。

本誌の研究論文、資料、特集のレポート等はMEDLINEで検索できます。

賛 助 会 員 名

エ レ ク タ 株 式 会 社	東 洋 メ デ ィ ッ ク 株 式 会 社
株 式 会 社 応 用 技 研	長 瀬 ラ ン ダ ウ ア 株 式 会 社
加 速 器 エ ン ジ ニ ア リ ン グ 株 式 会 社	ユ ー ロ メ デ ィ テ ッ ク 株 式 会 社
住 友 重 機 械 工 業 株 式 会 社	公 益 社 団 法 人 日 本 生 体 医 工 学 会
株 式 会 社 千 代 田 テ ク ノ ル	R T Q M シ ス テ ム 株 式 会 社
株 式 会 社 通 商 産 業 研 究 社	

目 次

解 説

技術報告書「前立腺癌密封小線源永久挿入治療におけるヨウ素125シード線源の品質保証」

¹²⁵I線源強度計測課題検討ワーキンググループ；小島 徹，川村慎二，大谷侑輝，山田崇裕，岡本裕之，加茂前 健，山下 修，大下 崇，黒澤忠弘，脇谷雄一郎，花田剛士，萬 篤憲，浪花健太，茂藤隆広，長谷川軍司，古畑 優，藤井克尚……………

1

〈RPT誌特集〉

表彰報告

2021年度RPT誌土井賞（優秀論文賞）・MCA・優秀査読者賞表彰の報告

納富昭弘……………

17

論文紹介

RPT誌土井賞受賞論文：U-Netを用いた各種臓器の自動セグメンテーションにおけるサンプルサイズとデータオーグメンテーションの効果

根本貴文，二上菜津実，国枝悦夫，八木政道，武田篤也，秋庭健志，エリデムツ，茂松直之……………

19

RPT誌土井賞受賞論文：脳PETにおける画像位置合わせ及び部分容積効果補正を同時に行うフレームワークの提案

松原佳亮，茨木正信，志田原美保，木下俊文……………

20

RPT誌土井賞受賞論文：全乳房放射線照射における，3次元畳み込みニューラルネットワークを用いた臨床標的体積の自動セグメンテーションの，勾配加重クラス活性化マッピングを用いた検証

大矢めぐみ，杉本 聡，笹井啓資，横山和仁……………

21

施設紹介

広島大学大学院医系科学研究科医学物理士養成コースの紹介

齋藤明登……………

22

書 評

『放射線物理学』“Physics of Nuclear Radiations: Concepts, Techniques and Applications”

渡部浩司……………

25

連載コラム：シカゴ通信

チリ，グアム島，チェコ，アルゼンチン

土井邦雄……………

26

編集後記……………

43

【複写される方へ】

本誌に掲載された著作物を複写したい方は，（社）日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の方でない限り，著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3階 一般社団法人 学術著作権協会
FAX: 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

著作物の転載・翻訳のような，複写以外の許諾は，直接本会へご連絡下さい。